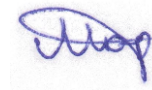


На правах рукописи



Морозов Егор Андреевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ГЛУБОКОЙ
МИНЕРАЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ДЛЯ ФОТОТРОФНОГО ЗВЕНА ЗАМКНУТЫХ
ЭКОСИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

1.5.6. Биотехнология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Красноярск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН) – обособленном подразделении «Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук» (ИБФ СО РАН)

Научный руководитель:

Тихомиров Александр Аполлинарьевич
доктор биологических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Ефремов Александр Алексеевич
доктор химических наук, профессор
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет»,
профессор кафедры химии политехнического института СФУ

Кособрюхов Анатолий Александрович
доктор биологических наук, старший научный сотрудник,
Институт фундаментальных проблем биологии Российской
академии наук (ИФПБ РАН) – обособленное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный
центр биологических исследований Российской академии наук»
(ФИЦ ПНЦБИ РАН), ведущий научный сотрудник, руководитель
группы экологии и физиологии фототрофных организмов

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Государственный научный центр Российской Федерации —
Институт медико-биологических проблем
Российской академии наук (ГНЦ РФ — ИМБП РАН)

Защита диссертации состоится 3 декабря 2021 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.228.03 на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН) по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 50.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института биофизики СО РАН и на сайте <http://www.ibp.ru>

Автореферат разослан «_____» октября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

Дементьев Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ:

Актуальность: По современным представлениям замкнутые биолого-технические системы жизнеобеспечения (БТСЖО) являются весьма перспективными для освоения среднего и дальнего космоса. Время автономного существования такой экосистемы определяется степенью циклического использования веществ, то есть коэффициентом замкнутости массообменных процессов экосистемы. Современными технологиями при длительности любой космической миссии более 2х лет, становится более оправданным организовать воспроизводство необходимых для жизнедеятельности людей веществ внутри системы, чем брать с собой в виде запасов. С ростом длительности космических миссий, требования к времени автономной работы ЗЭС, а следовательно — к коэффициенту замкнутости ее круговорота веществ, становятся все выше, а работы по дальнейшему его повышению начинают окупаться за счет снижения затрат по доставке грузов к месту назначения с Земли или других стационарных космических баз. Повышение коэффициента замкнутости на несколько процентов после 90% позволяет значительно повысить время автономного функционирования космической БТСЖО ограниченной массы, и потому становится тем более рентабельным и выгодным чем больше длительность предполагаемых космических миссий. Для ближайших миссий порядка десятков лет к другим планетам солнечной системы затраты на дальнейшее повышение замкнутости БТСЖО становятся рентабельными, а для межзвездных перелетов — абсолютно необходимы.

Степень разработанности темы исследования: Ведущие космические агентства мира и ряд частных компаний строят планы долговременных миссий от создания исследовательской базы на Марсе и последующей экспансии на другие небесные тела. При наличии средств, эти планы могут начать реализовываться в ближайшие 10-30 лет. Биологические эксперименты по разработке БТСЖО требуют больших временных затрат, существенно превышающих эти сроки. Поэтому потребность в разработке высокозамкнутых систем жизнеобеспечения для космических программ актуальна уже сегодня.

В мире существует множество экспериментальных комплексов исследующих такие системы — НЭК, «БИОС-3», «БИОСФЕРА-2», MELISSA, BIO-Plex, CEEF, Юэгуи-1, CELSS SPACEnter, и др. Высшие растения в обозримом будущем не имеют альтернатив в качестве основного источника пищи и средообразующего звена (Высшие растения...1979). Однако в естественных условиях переработка отходов требует слишком много времени и слишком много буферных емкостей, и в условиях жестких требования к массе космических БТСЖО, требуется физико-химическое ускорение процессов редукции отработанного органического материала до усвояемых высшими растениями форм. В виду относительно малых масштабов и очень ограниченного биоразнообразия, обеспечение устойчивого функционирования таких экосистем становится более сложной задачей.

Сегодня одним из наиболее важных научно-технологических направлений в создании высокозамкнутых БТСЖО является развитие быстрых, эффективных и экологически безопасных методов переработки органических отходов в формы минеральных солей и низкомолекулярных соединений, достаточно легкоусвояемые высшими растениями. Работы в данном направлении ведутся космическими агентствами различных стран, планирующих длительные космические полеты людей. Перспективным вариантом реализации является комплексное применение метода «мокрого сжигания» экзометаболитов людей и почвоподобного субстрата (ППС) для минерализации несъедобной растительной биомассы, разрабатываемых в лаборатории Управления Биосинтезом Фототрофов Института Биофизики СО РАН (Kudenko et al., 2000; Трифонов и др., 2014; Trifonov et al., 2015, Trifonov et al., 2016; Tikhomirov et al., 2011; Tikhomirov et al., 2012). Метод «мокрого сжигания» основан на радикально-цепном окислении органических отходов в водном растворе H_2O_2 активируемой переменным электрическим током.

Для создания более компактных БТСЖО важным представляется выполнения требований, связанных с максимизацией выхода полезной продукции (съедобной растительной биомассы) с

единицы площади фототрофного звена БТСЖО. Выполнение этих требований способствует уменьшению объема и веса БТСЖО. Возможность получения приемлемых урожаев культурных растений на поливочных растворах приготовленных на основе минерализованных продуктов «мокрого сжигания» органических отходов показана многочисленными экспериментами (Tikhomirov et al., 2003, 2008; Zolotukhin et al., 2005). Однако одной из важных нерешенных проблем при использовании такой технологии остается выпадение ряда щелочных элементов в труднорастворимый осадок, что делает невозможным их использование для минерального питания растений фототрофного звена БТСЖО. Хронической проблемой в экспериментах с выращиванием растений на продуктах «мокрого сжигания» являлся также недостаток Ca, Mg, P, Fe и некоторых других элементов в поливочных растворах, приготовленных на минерализованных органических отходах при их достаточном количестве в исходных продуктах. Поэтому применительно к организации круговоротных процессов БТСЖО, требуются дополнительные исследования по повышению доступности элементов минерального питания для употребляемых в пищу высших растений. Кроме того, для обеспечения экипажа животным белком в ряде космических БТСЖО предполагается культивация рыб (Gonzales & Brown, 2007), поэтому стоит задача вовлечения в биотический круговорот рыбных биоотходов.

Цель исследований диссертационной работы – повышение замкнутости круговорота веществ и продуктивности звена высших фототрофов БТСЖО за счет совершенствования комплекса физико-химических и биотехнологических методов трансформации биоотходов.

Комплекс **задач** для достижения цели включает:

1. Анализ потоков веществ в БТСЖО в зависимости от набора и структуры звеньев и разработка схемы комплексной технологии утилизации биоотходов с применением физико-химических и биотехнологических методов.

2. Повышение эффективности и совершенствование технологии «мокрого сжигания» биоотходов для снижения массы образуемых тупиковых продуктов, повышения выхода в раствор и биодоступности химических элементов, необходимых для питания культурных растений на гидропонике, за счет варьирования набора реагентов и параметров протекания процесса приготовления удобрений.

3. Экспериментальный анализ объема и состава сопутствующих новым процессам газов в случае введения новых реагентов.

4. Модернизация питательных сред с использованием растворов минерализованных экзометаболитов людей, получаемых по усовершенствованной технологии «мокрого сжигания», повышающей доступность элементов минерального питания, и исследование влияния на физиологические и продукционные характеристики высших растений.

5. Создание автоматизированной информационно-управляющей системы установки полупромышленного опытного реактора «мокрого сжигания» для снижения трудозатрат экипажа БТСЖО и оценка эффективности действия биотехнологического процесса.

6. Разработка биотехнологии трансформации трудноутилизуемых осадков, образующихся при физико-химической минерализации биоотходов методом «мокрого сжигания» с привлечением почвоподобного субстрата (ППС), и исследование динамики минерализации перерабатываемых биоотходов.

7. Разработка технологии вовлечения в круговоротный процесс БТСЖО тупиковых продуктов переработки рыбных отходов, повышающую биодоступность Ca, Mg, P, Fe, и других элементов минерального питания, которыми богаты рыбные отходы.

8. Анализ эффективности физико-химической и биотехнологической (с использованием ППС) трансформации трудноутилизуемых осадков, образуемых в процессе «мокрого сжигания» биоотходов, включая рыбные отходы, в удобрения, с учетом снижения потоков массы тупиковых продуктов, повышения замкнутости круговорота веществ и продуктивности высших растений.

Научная новизна работы:

1. Разработан перспективный для повышения замкнутости круговорота вещества в космических БТСЖО процесс глубокой физико-химической минерализации тупиковых продуктов переработки органических отходов, осуществляемый в смеси $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ активируемой переменным электрическим током, отличающийся повторным окислением тупиковых продуктов после первичного «мокрого сжигания» в водном растворе H_2O_2 отдельно от основного раствора в малом объеме с высокой концентрацией реагентов и низким рН, что позволяет перевести в доступную для питания высших растений на гидропонике растворимую форму более 90% зольных лимитирующих элементов минерального питания высших растений, что обеспечило повышение урожая съедобной массы растений (на примере салата) более чем в 2,2 раза и концентрации углеводов в 1,5 и белков в 1,2 раза.

2. Экспериментально установлены наиболее эффективные параметры электрического тока в процессе «мокрого сжигания» органических отходов применительно к космическим БТСЖО, отличающиеся частотой и формой импульсов, что повысило КПД использования электроэнергии и снизило время процесса на 17-18 %.

3. Воскообразный остаток, полученный после доокисления первичных тупиковых продуктов биоотходов в концентрированной смеси $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ составляет менее 30% от массы исходного труднорастворимого осадка и состоит преимущественно из солей жирных кислот (более 50% массы пальмитиновая), эффективно разлагается микрофлорой ППС с ускорением и включается в круговорот БТСЖО космического назначения, повышая его замкнутость.

4. Проанализированы основные газовые компоненты, выделяющиеся в ходе вновь разработанного процесса глубокой минерализации труднорастворимого осадка, отличающегося более глубоким вовлечением ранее тупиковых лимитирующих элементов минерального питания растений в круговоротный процесс БТСЖО.

Практическая значимость работы:

1. Разработана система автоматического мониторинга и компьютерного контроля в режиме реального времени основных параметров процесса мокрого сжигания: давления, напряжения, температуры, тока, обеспечивающая протекание биотехнологического процесса.

2. Разработан биотехнологический процесс доокисления тупиковых продуктов, остающихся после классического «мокрого сжигания» органических отходов, достаточно легко встраиваемый в имеющуюся технологическую цепочку круговоротных процессов, применительно к космическим БТСЖО.

3. Существенное увеличение урожая культивируемых на гидропонике растений, на примере салата, при добавлении в ирригационный раствор растворенной части ранее являвшегося тупиковым продуктом труднорастворимого осадка, позволяет рекомендовать к использованию разработанный комплексный физико-химический и биотехнологический процесс для будущих космических БТСЖО.

4. Наибольшую эффективность в повышении биодоступности элементов минерального питания разработанный комплексный процесс доокисления труднорастворимых осадков показал при совместной минерализации экзометаболитов людей и рыбных отходов, богатых Ca, Mg, P, Fe, и другими питательными элементами.

5. Повышена замкнутость БТСЖО: количество тупиковых продуктов было сокращено на 6,327 кг в год на человека в случае минерализации только экзометаболитов людей и на 7,117 кг в год на человека в случае культивации рыб в БТСЖО, в пересчете на члена экипажа.

Методология и методы исследования: Работы вели на основе оригинального метода «мокрого сжигания» органических отходов для переработки их в удобрения, разрабатываемого в ИБФ СО РАН. Проводили поисковые, сравнительные, комплексные электрохимические и биологические эксперименты; непосредственные электрические измерения параметров процессов; различные химические анализы элементного состава растворов и газов; сравнение масс образцов;

сравнение продуктивностей растений в заданных условиях при варьировании одного фактора; статистическую обработку результатов экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Снижение времени протекания и энергопотребления процесса «мокрого сжигания» органических отходов в водной среде H_2O_2 достигается за счет оптимизации параметров активирующего тока, что, в целом, способствует ускорению биотехнологического процесса и повышению замкнутости БТСЖО.

2. Понижение рН среды реакторной жидкости позволяет перевести в растворимую форму большую часть зольных элементов (более 90%) из остававшегося после классического «мокрого сжигания» труднорастворимого осадка, и сделать высвободившиеся минеральные элементы легко биодоступными для усвоения высшими растениями на гидропонике, что позволяет резко увеличить их продуктивность.

3. Продукты переработки, возникающие при разработанном процессе глубокой минерализации ранее тупиковых составляющих экзометаболитов людей с помощью разработанного комплекса физико-химических и биотехнологических методов, могут быть полностью вовлечены в круговоротные процессы БТСЖО космического назначения.

Апробация работы и публикации: Результаты работы доложены и обсуждены на 40-ой Научной Ассамблее COSPAR (Москва, 2014); III Международной научно-практической конференции посвященной Дню космонавтики «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 2017); 68-ом Международном Астронавтическом Конгрессе (Аделаида, Австралия, 2017); 42-ой Научной Ассамблее COSPAR (Пасадина, Калифорния, США, 2018); 43-ей Научной Ассамблее COSPAR (Сидней, Австралия, 2020).

Результаты диссертационной работы изложены в 22 печатных работах, из которых 7 статей опубликованы в журналах из перечня ВАК для кандидатской диссертации, 7 – в ведущих иностранных рецензируемых журналах (из них 7 индексируются в Scopus и 3 в Web of Science), 9 – в сборниках материалов конференций и тезисов, получен 1 — патент на полезную модель.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Российского Научного Фонда №14-14-00599 и №14-14-00599П «Создание экспериментальной модели высокозамкнутой биологической системы жизнеобеспечения людей для имитации круговоротных процессов применительно к автономным космическим станциям на Луне, Марсе и других небесных телах» и №17-74-10147 «Разработка метода утилизации санитарно-бытовых отходов для получения минеральных удобрений применительно к замкнутым экосистемам».

Достоверность полученных результатов: обеспечивается использованием современного лабораторного оборудования в ИБФ СО РАН на основе экспериментального комплекса БИОС-3 и экспериментальных стендов, газоанализаторов и иных измерительных приборов лаборатории Управления Биосинтезом Фототрофов и Аналитической Лаборатории, воспроизведением экспериментов в 3 и более повторностях, и статистической обработкой полученных данных.

Благодарности: Автор выражает искренние благодарности д.б.н., проф. А.А. Тихомирову за научное руководство, и коллегам по лаборатории Управления Биосинтезом Фоторофов ИБФ СО РАН за помощь на всех этапах работы, а именно: к.б.н. С.В. Трифонову, к.ф.-м.н. Ю.А. Куденко, к.б.н. С.А. Ушаковой, Э.К. Волковой, к.б.н. Н.А. Тихомировой, к.б.н. В.В. Величко, инженеру М.В. Мачкову, инженеру Павловой А.М., и др. Кроме того, автор благодарен к.ф.-м.н. Салтыкову М.Ю., к.б.н. Анищенко А.В., и сотрудникам других лабораторий и организаций за помощь на различных этапах лабораторных исследований.

Структура работы: Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы. Работа содержит 158 страниц, включая 31 рисунок и 34 таблицы. Список литературы включает 188 ссылок на работы отечественных и иностранных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении обоснована актуальность тематики исследования, цели и задачи работы, положения выносимые на защиту, показана научная и практическая значимость данного исследования.

Глава 1. Анализ современного состояния технологий переработки биоотходов для повышения замкнутости БТСЖО космического назначения (обзор литературы)

В первой главе дан краткий обзор отечественных и зарубежных исследований, посвященных проблеме переработки органических отходов в удобрения применительно к замкнутым БТСЖО. Глава начинается с анализа планируемых на сегодня миссий, и обоснования того, что наиболее перспективным вариантом систем жизнеобеспечения являются системы, где основную средообразующую функцию выполняют высшие растения, а процессы редукции органического вещества ускоряются рядом физико-химических методов (Трифонов и др, 2012). Рассматриваются наиболее распространенные методы физико-химической и биотехнологической переработки биоотходов в удобрения для фототрофного звена замкнутых БТСЖО, как использовавшиеся ранее, так и современные. Более подробно описано развитие метода «мокрого сжигания» органических отходов в H_2O_2 (Kudenko et al., 1997; Tikhomirov et al., 2010), который был модернизирован в данной работе. Во второй части главы рассматриваются конструкции биолого-технических систем жизнеобеспечения, где основную средообразующую функцию выполняют высшие растения как главный источник воспроизводства пищи (Замкнутая система: человек - высшие растения, 1979 ; Малоземов, 1986; Yuming, Hong, 2009), которые могут дополняться микроводорослями в небольшом количестве (Проблемы создания ... , 1975; Lasseur, 1996; Vieira da Silva, Lasseur, 2004; Ling et al., 2009). Часть белковой пищи может воспроизводиться с помощью рыб, червей и иных гетеротрофных организмов (Hashimoto et al., 2007; Verbitskaya et al., 2010; Hashimoto, 2007; Xiaohui et al., 2009). Так же рассматриваются возможности использования бактериальных культиваторов (Проблемы создания ... , 1975; Closed Habitation Experiments ..., 2004; Application of a Closed ..., 2007; Roughton et al., 2009) и почвоподобных субстратов (Manukovsky et al., 1997; Wenting et al., 2009), как биотехнологических методов утилизации части растительных отходов. В третьей части главы проводится обзор существующих экспериментальных прототипов замкнутых БТСЖО, включающих людей: «БИОС-3» (СССР – Россия), НЭК, ВЮ-Рлех, BIOSPHERE-2 (США), СЕЕФ (Япония), MELISSA (ЕС), Китайский Центр Подготовки Космонавтов в Пекине (Китай), Юэгу-1 (Китай), SPACEnter CELSS Космического Института Южного Китая в Шэньчжэне (Китай). Показано, что высшие растения являются основой будущих космических БТСЖО, а роль физико-химических и биотехнологических методов приготовления удобрений заключается в ускорении процессов редукции органического материала таким образом, чтобы получать максимальные урожаи, поскольку ими выполняются самые жизненно важные функции — воспроизводство кислорода, воды и пищи для экипажа. Проанализированы проблемы усвоения питательных элементов высшими растениями на гидропонике. Рассматриваются проблемы баланса питательных растворов и доступности элементов минерального питания высших растений, как в условиях теплиц так и современных БТСЖО. Кроме того, рассматриваются возможности повышения эффективности метода «мокрого сжигания» и биотехнология переработки ранее тупиковых продуктов от биоотходов в ППС для создания более совершенных БТСЖО нового поколения.

Глава 2. Объект и методы исследования

Исследования велись на основе комплекса оригинального метода «мокрого сжигания» органических отходов и биотехнологии утилизации растительных биоотходов в ППС, разрабатываемых в лаборатории УБФ ИБФ СО РАН. Объектом исследования являлась

технологическая подсистема физико-химической и биотехнологической переработки органических биоотходов в удобрения для растений.

Для минерализации биоотходов использовались: кварцевый лабораторный реактор рабочим объемом 1,25 л со стержневыми графитовыми электродами; полупромышленный фторопластовый реактор рабочим объемом 9 л со стержневыми графитовыми электродами; горизонтальный и вертикальный капролоновые экспериментальные реакторы рабочим объемом 1,3 л с плоскими графитовыми электродами.

Принятые суточные нормы типичных для БТСЖО органических отходов в пересчете на члена экипажа, и соответствующие им нормы расхода H_2O_2 приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 — расход H_2O_2 при минерализации различных типов органических отходов в реакторе «мокрого сжигания» и суточные нормы соответствующих отходов

Вид и норма органических отходов	Расход 33% H_2O_2
Моча — 1500 мл * чел / сут	0,5 мл H_2O_2 на 1 мл мочи
Кал — 150 г * чел / сут	4 мл H_2O_2 на 1 г нативного кала
Рыбные отходы - 50 г * чел / сут	4 мл H_2O_2 на 1 г сухих рыбных отходов
Солома пшеницы - 375 г * чел / сут	16 мл H_2O_2 на 1 г сухой соломы

В качестве модельного дополнительного источника белка в экспериментах использовался пресноводный карп (Трифонов и др., 2017).

Все растворы после минерализации доводили дистиллированной водой до первоначального объема перекисного раствора органических отходов для сравнительных анализов, так как в разных типах реакторов и опытных вариантах растворы упаривались в различной степени (Трифонов и др., 2012). Количество остаточной недоокисленной органики оценивали по значению химического поглощения кислорода (ХПК), определяемому титриметрическим методом (ПНД Ф 14.1:2.100-97).

Элементный состав осадков, растворов и ППС определяли в аналитической лаборатории ИБФ СО РАН (Morozov et al, 2018) с помощью спектрометра iCAP 6300 Duo ICP-OES (Thermo Scientific, U.K., 2010) в соответствии с EPA 200.7. Следовые количества элементов в воде, растворах и твердых пробах, включая биологические, определяли с помощью метода индуктивно связанной плазмы (ИСП) - inductively coupled plasma (ICP) (33 элемента). Многокомпонентные растворы ICP (IV, XVI) фирмы Merck (Darmstadt, Germany) и чистые химические реактивы для спектрометрии (CaO , MgO , KCl , Na_2SO_4 , $(NH_4)_2HPO_4$) использовали для калибровочных растворов. Перед анализом все образцы были озолены в $HNO_3:HClO_4$ (1:1, аналитическая чистота) на лабораторной плите. Пустой реагент готовили таким же образом. Образцы и калибровочные растворы (Morozov et al, 2018) готовили с использованием деионизированной воды (18 M Ω).

Анализ различных форм азота в поливных растворах в ходе эксперимента проводили в лаборатории управления биосинтезом фототрофов ИБФ СО РАН (Трифонов и др., 2012). Общий азот определяли ускоренным колориметрическим методом (Плешков, 1976). Для определения нитратного азота использовали колориметрический метод с применением дисульфифеноловой кислоты (Плешков, 1976). Аммиачный азот в растворах определяли фотоколориметрическим методом с реактивом Несслера (Плешков, 1976).

Содержание сырого протеина в зернах пшеницы оценивали путем умножения суммарного количества азота на общепринятый коэффициент 5,7 для зерна (Tikhomirova et al, 2019) и 6,25 для вегетативных органов салата. Углеводный анализ проводили следующими методами: количество углеводов определяли гидролизом соляной кислотой и последующим определением обычных сахаров йодометрическим методом с медно-щелочным реагентом, гидролиз целлюлозы до сахаров проводился серной кислотой с последующим определением йодометрическим методом с медно-

щелочным реактивом (Tikhomirova et al, 2019). Концентрацию CO₂ в герметичной вегетационной камере измеряли с помощью газоанализатора LI-820 (LI-COR, США). CO₂ - газообмен оценивали по следующим характеристикам: видимый фотосинтез, выделение CO₂ на свету (световое дыхание) (Рвид, R). Видимый фотосинтез оценивали по изменению концентрации CO₂ в замкнутом объеме в единицу времени. Дыхание на свету оценивали по величине темного дыхания в первые 20 мин после выключения света (Tikhomirova et al, 2019). Для измерения масс растений, осадков, и иных образцов, использовали лабораторные весы с точностью ±0,05 г.

Основой для способа доокисления осадка (Mogozov et al, 2018) послужил метод озонения проб в H₂O₂ и HNO₃ 1:1 из аналитической химии (Бок, 1984). Для анализа газовых компонент выделяющихся при вновь разработанном техническом процессе доокисления осадка в смеси H₂O₂ и HNO₃ 1:1 (Mogozov et al, 2018) использовались газоанализаторы: Witt на O₂; Li-COR 840 на CO₂; Teledyne model T300 на CO; Teledyne model T200 на NO, NO₂, NO_x; Gamma 100 на CH₄. Летучие соединения S определялись аналитически через улавливание в растворах Na₂CO₃, NH₃ — в H₂SO₄.

Для проверки степени повышения усвояемости растворенных в результате нового технологического процесса доокисления осадка в смеси H₂O₂ и HNO₃ 1:1 питательных элементов выращивали растения салата «Московский парниковый» в открытых камерах. Сравнивали два опытных варианта с использованием нового технологического процесса доокисления осадка и без него, и контроль на модифицированном растворе Кнопа, где минеральное питание растений было в насыщении. В количестве питательных элементов в опытных вариантах исходили из того, что все минеральное питание растения салата получают только из соответствующего количества экзометаболитов людей. Концентрацию форм азота в поливных растворах салата на гидропонике измеряли каждые 3 суток. Для каждого варианта массу полученной продукции вычисляли как среднее для 4 выборок по 6 растений каждая, а ошибку считали по t-критерию Стьюдента для доверительной вероятности P > 0,95 (Mogozov et al, 2018).

Для исследования динамики окисления воскообразного остатка использовался типичный для БТСЖО почвоподобный субстрат (Manukovsky et al., 1997) из соломы пшеницы, который заготавливался централизованно на многие эксперименты. ППС получали по технологии ускоренного компостирования измельченной соломы с помощью ферментирования, специальных бактерий и калифорнийских червей. Поскольку корневые выделения играют важную роль в биодоступности питательных элементов в почве, на ППС выращивали салат. Используемый в БТСЖО ППС в котором компостируют солому пшеницы и иные компоненты несъедобной растительной биомассы, обладает широким спектром микрофлоры (таблица 2.2), позволяющей минерализовывать различные органические отходы получая усвояемые культурными растениями питательные среды (Сысоева и др., 2013; Сысоева Тирранен, 2014). Исследователи отмечают также биосанитарные свойства ППС (Хижняк, Мануковский, 2016).

Таблица 2.2. Микробиологический состав ППС (КОЕ /1г сухой массы ППС) (Сысоева и др., 2013)

Группы микроорганизмов	Численность
Бактерии, усваивающие органический азот, 1×10 ⁶	4,37 ± 0,41
Бактерии группы кишечной палочки, 1×10 ³	7,94 ± 1,08
Фитопатогенные бактерии, 1×10 ³	13,89 ± 0,25
Бактерии-анаэробы, 1×10 ⁴	2,44 ± 0,18
Микроскопические грибы, 1×10 ³	18,55 ± 0,33
Бактерии, усваивающие минеральный азот, 1×10 ⁵	1,98 ± 0,25
Целлюлозоразрушающие, 1×10 ³	9,14 ± 0,91

Глава 3. Повышение эффективности физико-химической минерализации биоотходов для фототрофного звена БТСЖО

Весьма перспективным для искусственного физико-химического звена редуцентов в будущих БТСЖО с экипажем из нескольких человек представляется использовать принцип жидкофазного окисления органических отходов активными формами кислорода в водной среде. H_2O_2 на сегодня является наиболее экологически чистым, эффективным и легко воспроизводимым во внутрисистемном круговороте видом окислителя. Разрабатываемая в ИБФ СО РАН последовательная технологическая подсистема физико-химической переработки биоотходов для получения из них питательных растворов для выращивания культурных растений на гидропонике применительно к замкнутым экосистемам космического назначения состоит из трех основных реакторов: «мокрого сжигания», разложения мочевины и синтеза H_2O_2 . Упрощенная схема технологического процесса представлена на рис. 3.1.

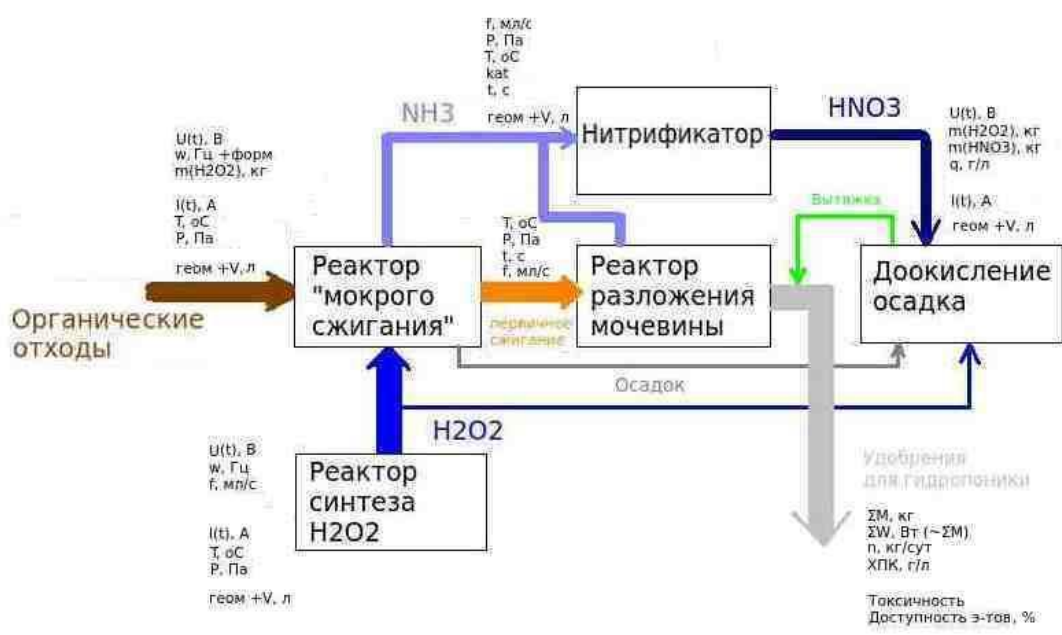


Рисунок 3.1. Упрощенная схема технологической подсистемы переработки органических отходов для БТСЖО высокой степени замкнутости (Морозов и др., 2017)

В работе предложена формула основной целевой функции, характеризующей интегральную массу БТСЖО для космической миссии. При составлении этой формулы исходили из следующих соображений. Стоимость грузопотока на орбиту, хотя и была существенно снижена за последнее время, сегодня начинается от нескольких тысяч долларов за кг полезной нагрузки. Так, минимальная стоимость доставки 1 кг груза на МСК составляет сегодня порядка \$23,300/kg (Jones, 2018). Поэтому в качестве основной целевой функции соискателем предлагается следующая формула минимизируемой интегральной массы БТСЖО $M_{\Sigma} \rightarrow \min$, приходящейся удельно на члена экипажа (3.1):

$$M_{\Sigma} = M_{уст} + M_{био} + M_{фон} + M_{буф} + M_{эн} + M_{расч} + M_{корп}, \quad (3.1)$$

Интегральная масса БТСЖО принималась состоящей из масс установок, биологических систем, фоновых сред, буферных емкостей, энергосистем, расходных материалов, и корпусов. Приведены формулы зависимостей вышесказанных масс от времени автономного функционирования БТСЖО, числа членов экипажа, времени цикла, и иных параметров.

Наиболее широко принятым в мире критерием оптимизации БТСЖО на сегодня является минимальная интегральная масса системы (Bartsev et al, 1996). Однако интегральная масса БТСЖО M_{Σ} , особенно в условиях не полностью известной конфигурации и некоторых параметров компонентов, в большинстве случаев (Bartsev et al, 1996) может быть упрощена до вида (3.3):

$$M_{\Sigma} = M_{LSS} + r \cdot t_{\Sigma}, \quad (3.3)$$

где M_{LSS} — не расходуемая часть массы системы, кг; r — расходуемая масса вносимая в БТСЖО в единицу времени, кг/сут; t_{Σ} — время автономного функционирования БТСЖО, сут.

При этом, ограничениями на целевую функцию минимизации массы БТСЖО, являются требования заданного функционала системы для заданного числа членов экипажа (прежде всего, как время в человеко-часах, отведенное на выполнение основных задач миссии), требуемое время автономного функционирования БТСЖО, и ограничения надежности.

Для повышения энергоэффективности процесса «мокрого сжигания», была проведена оптимизация параметров тока, активирующего распад перекиси водорода (Морозов и др., 2014). Переменный ток инициирует распад перекиси водорода, что ускоряет образование таких радикалов, как $O\bullet$ и $OH\bullet$, благодаря чему ускоряется процесс окисления органических отходов. О скорости разложения перекиси можно косвенно судить по скорости выделения газов из окисляемого раствора отходов.

Поиск наиболее эффективно частоты активирующего распад перекиси водорода тока проводился на малом масштабе при меньшем напряжении (30 В), при термостатировании водным охлаждением $22,5 \pm 2,5$ °С (Морозов и др., 2014). Опыты проводились на трех типичных для БТСЖО видах отходов (урина, человеческие экзометаболиты + рыбные отходы, солома), и водном растворе перекиси водорода (рис. 3.2).

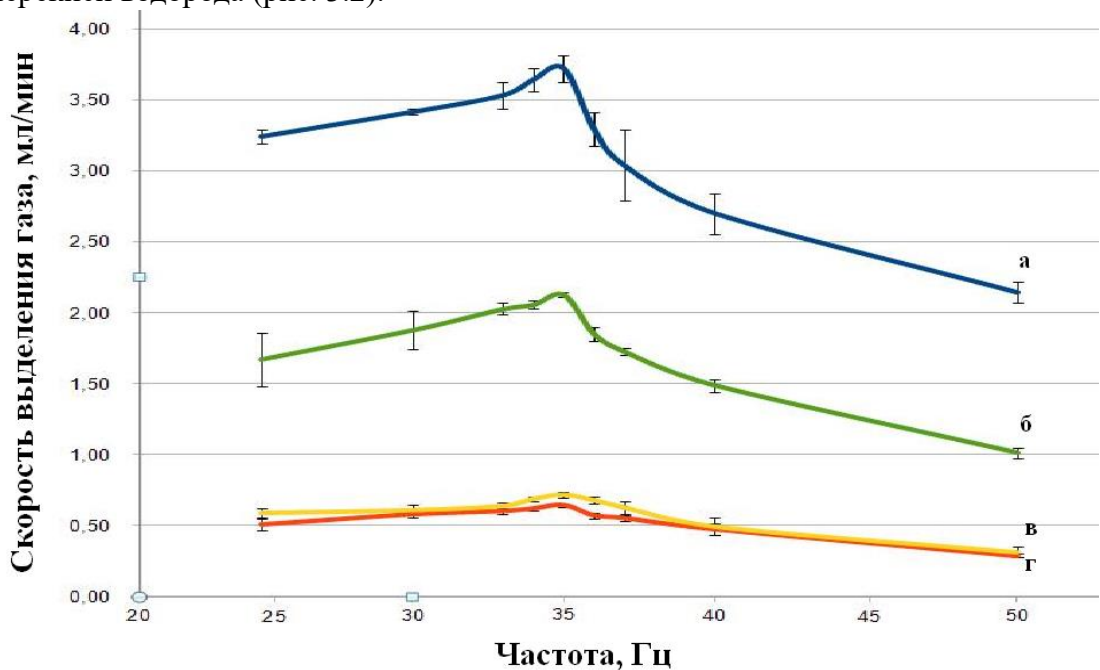


Рисунок 3.2 — Зависимость скорости выделения газа (мл/мин) от частоты (Гц).
 а — холостой ход, б — урина, в — экзометаболиты + рыбные отходы,
 г — солома (Морозов и др., 2014)

Измеряли время выделения 10 мл газа, что соответствовало единицам минут — стадии разгона процесса (Морозов и др., 2014). Оказалось, что для всех типов отходов характерный максимум соответствует частоте 35 Гц, где скорость выделения газа была приблизительно в 2 раза выше, чем на частоте бытовой сети 50 Гц, использовавшейся ранее.

При изменении формы тока с синусоиды на меандр, скорость выделения газа увеличилась приблизительно на 10% при том же характере кривой зависимости от частоты.

Однако при масштабировании процесса до лабораторного реактора 1,2 л и уровнях напряжения 80 В разгонное и 50 В рабочее, и проведении полного цикла «мокрого сжигания» человеческих экзометаболитов, влияние параметров тока на ход реакции оказалось существенно меньше (Морозов и др., 2014).

Таблица 3.1 — Сравнение времени и энергопотребления процесса окисления органических отходов при разных параметрах активирующего тока через 1 сутки после приготовления (Morozov et al., 2015).

	35 Гц меандр	35 Гц синусоида	50 Гц меандр	50 Гц синусоида
Время процесса, мин	115	123	132	141
Затраченная энергия, кВт*ч	0,599	0,645	0,664	0,724
ХПК, г/л	2,589	2,995	2,746	2,933

Точность измерения ХПК в пределах 10%, отличие в энергопотреблении и времени протекания процесса между повторностями составляет не более 7 %.

Как видно из таблицы 3.1, при минерализации через сутки после приготовления растворов, изменение параметров активирующего тока от синусоиды 50 Гц к меандру 35 Гц дает 18 % экономии по времени и 17% – по энергопотреблению.

Ранее регистрация измеряемых параметров реакции (ток, напряжение, давление, температура) производилась вручную. Это порождало неточности и пробелы в графиках, связанные с человеческим фактором. Кроме того, при записи параметров каждые 5 минут можно упустить какие-то пиковые значения. А самое главное — требовало занятости оператора в течении всего процесса, что, очевидно, в будущем неприемлемо, т. к. время экипажа представляет большую ценность для выполнения задач миссии (Салтыков и др., 2016).

Соискателем было проведено проектирование, сборка и пусконаладка информационной системы для полупромышленной установки «мокрого сжигания». Система, собранная из стандартных компонент, обеспечивает автоматическую цифровую регистрацию параметров процесса, и возможность удаленного/автоматического управления процессом.

В ходе работы, полупромышленный реактор был оснащен (Салтыков и др., 2016) цифровыми датчиками, регистрирующими основные параметры протекания процесса: ток (А), давление (Р), напряжение (V) и температуру (Т). Схема расположения датчиков и системы управления представлена на рис. 3.3.

Программа пользовательского интерфейса и обработки данных написана на языке Free Pascal в среде разработки Lazarus. Программное обеспечение осуществляет чтение данных с датчика давления, температуры, а также цифровых амперметра и вольтметра подключенных к персональному компьютеру и осуществляет их запись на жесткий диск. Мониторинг датчиков производится с частотой в 1 Гц.

При превышении давлением в реакционной камере некоторого порогового значения (устанавливается пользователем, по умолчанию 1800 Паскалей) происходит автоматическое переключение режима блока питания со 100 В на 50 В, включение пеногасителя и платинового катализатора. Отключение питания всей установки, включая пеногаситель и катализатор, производится в двух случаях (Салтыков и др., 2016):

1. плановое отключение при исчерпании реакционной массы и, следовательно, падения давления (по умолчанию -200 Паскаль относительно атмосферного).
2. аварийное отключение в случае чрезмерного повышения давления в камере (по умолчанию 3000 Па).

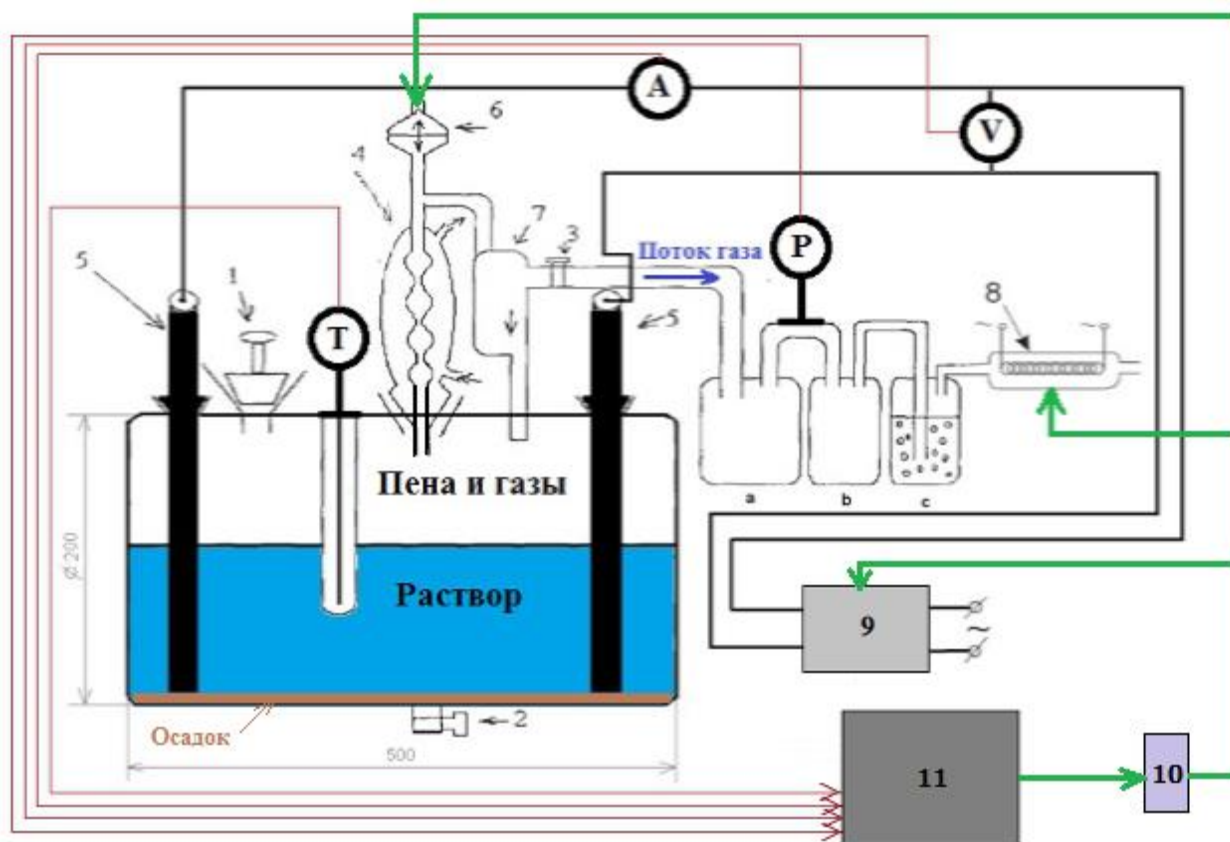


Рисунок 3.3 – Экспериментальная установка реактора «мокрого» сжигания с платиновым катализатором и оптимизированными параметрами тока, оснащенная системой автоматической регистрации параметров протекания реакции: 1 – крышка для залива перекиси и отходов; 2 – сливной клапан; 3 – вентиль; 4 – змеевик охлаждения газов; 5 – электроды; 6 – пеногаситель с серводвигателем; 7 – емкость для сбора излишков пены; а, б – сосуды, предохраняющие от смешивания раствор из реактора и кислоты из сосуда сбора аммиака; с – сосуд сбора аммиака с 6 %-ной кислотой; 8 – платиновый катализатор для окисления водорода и летучих углеводородов; 9 – блок питания с регулируемой частотой и формой тока; 10 – управляющий микроконтроллер, 11 – ЭВМ для записи параметров хода реакции (Салтыков и др., 2016).

Результатом явилась автоматическая запись на компьютер в реальном времени тока, напряжения, давления и температуры в реакторе. Графики вышеназванных параметров строятся в реальном времени по мере регистрации, и сохраняются в массиве данных с возможностью последующей математической обработки (Салтыков и др., 2016).

В последующих экспериментах была собрана установка «мокрого сжигания» объемом 9 л иной конфигурации. Соискатель произвел более тщательную герметизацию газовых путей установки, из-за чего пороговое давление высоты столба колбы для улавливания NH_3 стало набираться значительно быстрее чем процесс успевал разогнаться, из-за чего увеличивалось время и энергопотребление и снижалось качество процесса. В результате, соискателю пришлось изменить логику управления процессом: теперь первое переключение с разгонного напряжения на рабочее происходит по достижении температуры кипения (98°C), а отключение — так же по разряжению, как и ранее (Морозов и др., 2017).

Глава 4. Разработка и апробация методов приготовления удобрений из биоотходов для фототрофного звена замкнутых БТСЖО

Для растворения тупиковых осадков был проведен ряд поисковых экспериментов.

Использование органических растворителей оказалось бесперспективно, т.к. во всех случаях оставалось более половины осадка, и их применение трудно встроить в круговорот БТСЖО.

Далее, использовали кислоты и щелочи. В качестве кислоты была выбрана HNO_3 ввиду ее синтеза в имеющейся цепочке круговоротных процессов БТСЖО, а щелочь — KOH ввиду ее преобладания в продуктах диализа мочевины. Омыление и «мокрое сжигание» тупиковых продуктов переработки человеческих экзосметаболитов в щелочи (KOH) оказалось еще менее эффективно, чем использование органических растворителей.

Кислоту (HNO_3) сначала добавляли в весь раствор человеческих экзосметаболитов с H_2O_2 перед процессом «мокрого сжигания». Однако, даже при росте концентрации HNO_3 вплоть до количества соответствующего полной нитрификации NH_3 выделяющегося при «мокром сжигании» соответствующего количества экзосметаболитов, результаты все же не были удовлетворительными.

После, аналогично найденной в литературе (Бок, 1984) методике озоления органических проб, высушенный труднорастворимый осадок окисляли отдельно от основного раствора в малом объеме смеси $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ 1:1 что дало более высокую концентрацию реагентов и ниже значения pH при том же количестве молей реагентов, под действием переменного тока. Данный метод позволил перевести в растворенную ионную форму более 90% питательных элементов, и оказался значительно более эффективен, чем добавление кислоты непосредственно в весь раствор перед классическим «мокрым сжиганием» (Тихомиров и др, 2016).

При использовании NH_4NO_3 как возможного продукта неполной нитрификации реакторных газов, содержащего такое же количество молей азота N что и HNO_3 , эффективность процесса доокисления осадка оказалась существенно ниже, из чего следует рекомендация максимально глубокой нитрификации реакторных газов.

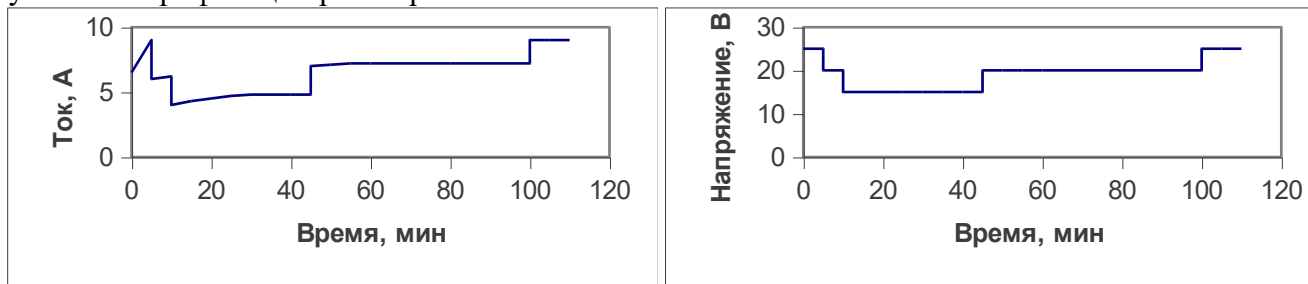


Рис. 4.1-4.2. Динамика силы тока и напряжения при доокислении Осадка 1 в смеси $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HNO}_3$ 1:1

Далее была проведена экспериментальная оценка (Morozov et al, 2018) повышения усвоения минерализованных отходов, полученных в установке физико-химического окисления, растениями на гидропонике применительно к замкнутым экосистемам.

Технологические особенности приготовления растворов и анализы. Предположительно, вывод значительной части минеральных элементов из осадка в раствор возможно осуществить путем добавления в реактор к H_2O_2 азотной кислоты (Morozov et al, 2018). Данное предположение основывается на существующих методах доокисления органических проб в смеси сильной кислоты и H_2O_2 , что позволяет ожидать растворение осадка (Бок, 1984). Также, добавление кислоты снижает pH образующегося раствора, что положительно сказывается на степени растворимости минеральных солей. В этом случае наиболее логично, с точки зрения круговоротных процессов в системе, использование HNO_3 , которую можно получать в ходе нитрификации NH_3 , выделяющегося после переработки отходов (Тихомиров и др., 2011, Isupova et al., 2005, Isupova et al., 2009). Целью данного этапа работы является разработка метода перевода осадка, образующегося после физико-химической минерализации экзосметаболитов людей, в растворимое состояние повышающее биодоступность для растений на гидропонике, тем самым вовлекая ранее тупиковые продукты минерализации биоотходов в круговоротный процесс (Тихомиров и др., 2016).

Для проверки возможной степени выведения минеральных элементов из осадка суточная

доза жидких и плотных экзометаболитов людей (1500 мл урины + 150 г нативного кала) (Замкнутая система..., 1979) была подвергнута физико-химическому окислению 33%-го водным раствором H_2O_2 (1400 мл) в переменном электромагнитном поле и ферментативному разложению мочевины по ранее описанной методике (Сутормина, 2011). В результате была получена взвесь, которую после осаждения разделили на супернатант **1** и осадок **1** (3 л супернатанта и 11,25 г сухого осадка), минеральный состав которых приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Минеральный состав супернатанта **1** и осадка **1** классический (Тихомиров и др., 2016)

Образцы	Ca	Fe	K	Mg	N	Na	P	S
Супернатант 1, мг/л	38,47 ±3,85	1,11 ±0,11	1460 ±146	50,18 ±5,02	2158 ±216	1573 ±157	280 ±28	331 ±33
Осадок 1, мг/г	93,03 ±9,30	0,65 ±0,06	36,8 ±3,7	39,0 ±3,9	30 ±3	39,0 ±3,9	76,8 ±7,6	8,2 ±0,8
Степень растворения, %	10	31	91	26	95	92	49	92

Для доокисления осадка **1** молярное соотношение H_2O_2 и HNO_3 составляло 1:1. В соответствии с требованиями повышения замкнутости массообменных процессов в системах жизнеобеспечения, максимальное количество приливаемой HNO_3 должно быть эквивалентно количеству азота в аммиаке, выделяющегося при минерализации отходов, что составляет приблизительно 4,85 мл 56% HNO_3 на 1 л раствора минерализованных экзометаболитов при условии полного каталитического окисления аммиака.

Время доокисления осадка **1** составляло порядка 2 ч. Для быстрой инициации реакции доокисления использовали переменный ток с напряжением 80 В и силой тока 7 А в течение первых двух минут. В дальнейшем напряжение снизили для поддержания нормального хода процесса, и оно составляло 40 В при колебаниях тока в пределах 3-5 А (Тихомиров и др., 2016; Morozov et al, 2018).

После доокисления 11,25 г осадка **1** в смеси H_2O_2 и HNO_3 1:1, его оставшаяся масса (осадок **2**) составляла 3,6 г, то есть масса осадка уменьшилась более, чем в 3 раза. Полученная после доокисления осадка **1** жидкость – вытяжка из осадка **1**, доведенная дистиллятом до 1 литра, имела рН ~ 1. Чтобы проверить вероятность выпадения минеральных элементов снова в осадок в ирригационном растворе при рН, не ниже 5,5, в мерном цилиндре вытяжку из осадка **1** развели дистиллированной водой и добавили жидкие продукты минерализации человеческих экзометаболитов в следующей пропорции (14 мл вытяжки + 800 мл дистиллята + 386 мл жидких продуктов минерализации) и поставили отстаиваться. В полученном растворе рН составлял ~ 7,6. Через трое суток раствор был прозрачным, выпадения осадка не наблюдалось. После проверки качества растворения осадка **1**, в супернатант **1** была добавлена вытяжка из осадка **1**. Минеральный состав полученного раствора (супернатант **2**) приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Минеральный состав супернатанта **2** и осадка **2** с доокислением (Тихомиров и др., 2016)

Образцы	Ca	Fe	K	Mg	N	Na	P	S
Супернатант 2, мг/л	268,7 ±26,9	3,64 ±0,36	1552 ±155	147,8 ±14,8	4863 ±486	1646 ±165	484,3 ±48,4	376 ±38
Осадок 2, мг/г	32,3 ±3,2	1,23 ±0,12	12,1 ±1,2	13,6 ±1,4	20 ±2	12,1 ±1,2	30,5 ±3,0	2,4 ±0,2
Степень растворения, %	87	71	99	90	99	99	92	99

В результате была значительно увеличена (Morozov et al, 2018) степень выхода минеральных биоэлементов в раствор из осадка **1** (табл. 4.1). Так, например, удалось добиться выведения из осадка **1** в раствор ~ 90 % Ca, Mg, P и ~ 70 % Fe, которые ранее были практически недоступны для минерального питания высших растений на гидропонике (см. табл. 4.1 и 4.2).

Условия выращивания растений и оценка их продуктивности. Для оценки эффективности вовлечения высвободившихся после растворения осадка минеральных элементов в круговоротный процесс (Morozov et al, 2018) были проведены эксперименты по выращиванию растений салата сорта «Московский парниковый» на питательных растворах, приготовленных с использованием продуктов минерализации по ранее принятой (Tikhomirov, 2003) и вновь разработанной (Тихомиров и др., 2016) технологиям. Способ культивирования растений – гидропоника на керамзите. Свежий керамзит был тщательно промыт, чтобы удалить из него водорастворимые минеральные элементы.

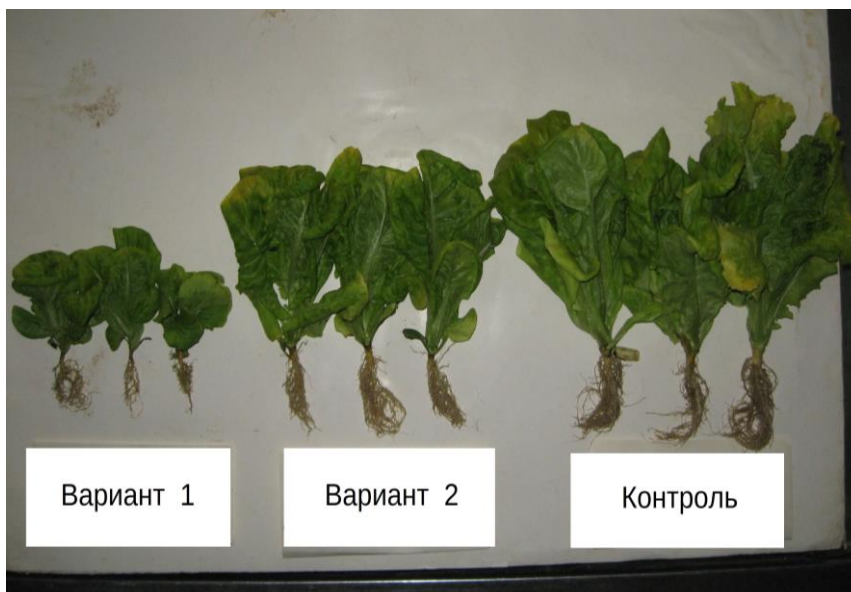


Рисунок 4.1. Три средних растения из каждого экспериментального варианта с различным минеральным питанием (Morozov et al, 2018)

Эксперименты включали два опытных варианта и контроль (Тихомиров и др., 2016; Morozov et al, 2018). **Вариант 1:** питательный раствор был приготовлен на основе жидких продуктов минерализации из расчета концентрации калия 200 мг/л в поливном растворе. Для этого в отстоянную водопроводную воду добавили 143 мл супернатанта **1** на 10 л раствора. Осадок **1** вносили в керамзит перед посевом растений. **Вариант 2:** питательный раствор в варианте **2** готовили как в варианте **1**, используя супернатант **2**. Осадок **2** вносили в керамзит перед посевом растений. **Контроль:** раствор Кнопа использован в качестве контроля, раствор меняли каждую неделю, при выращивании на этом растворе растения не испытывали лимитов по элементам минерального питания.

Питательные растворы вариантов **1** и **2** в процессе роста растений не меняли, а проводили ежесуточную коррекцию соответствующими растворами жидких продуктов минерализации экзометаболитов людей, поддерживая концентрацию общего азота (нитратный + аммонийный) в пределах 200 - 350 мг/л (Тихомиров и др., 2016). На протяжении всего эксперимента, корректирующие растворы вносили в одно время и в одинаковом объеме в оба опытных варианта (Morozov et al, 2018). В Варианте **1** добавляли в раствор минерализованных экзометаболитов людей идентичное количество HNO_3 , которое использовали в Варианте **2** при доокислении труднорастворимых осадков. Опыты проводили в двукратной повторности.

Таблица 4.3. Элементный состав поливных растворов в зависимости от степени минерализации экзометаболитов людей (Тихомиров и др., 2016)

Свежеприготовленный поливной раствор	N			Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S	pH
	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	органический								
Вариант 1, мг/л	176 ±18	89 ±9	94 ±9	5,5 ±0,5	0,16 ±0,02	209 ±21	7,2 ±0,7	225 ±22	40 ±4	47,4 ±4,7	5,5 ±0,6
Вариант 2, мг/л	167 ±17	75 ±8	74 ±7	38,4 ±3,8	0,52 ±0,05	222 ±22	21,1 ±2,1	235 ±24	69,3 ±6,9	53,8 ±5,4	5,5 ±0,6

У поливных растворов pH поддерживали в пределах от 5,5 до 6,0. При необходимости для поддержания pH использовали разбавленную азотную кислоту. Интенсивность фотосинтетически активной радиации на уровне листьев составляла 120 ± 7 Вт/м². Температура в камере поддерживалась в пределах $24,5 \pm 1$ °С, влажность воздуха составляла 50-60%, концентрация CO₂ была на уровне естественной (380 ppm). Совокупная площадь посева в каждом варианте составляла 0,155 м². Длительность вегетации от всходов до уборки урожая салата была равна 25 суткам (Тихомиров и др., 2016).

Поливной раствор Варианта 2 (см. таблицу 4.3) близок по составу к широко употребляемому в промышленной гидропонике модифицированному раствору Кнопа (Коваль, Шаманин, 1999) по концентрациям большинства макроэлементов, за исключением дефицита Ca и Fe в несколько раз, и избытка Na более, чем на порядок (см. таблицу 4.4).

Таблица 4.4. Состав модифицированного раствора Кнопа (Коваль, Шаманин, 1999)

Кноп	N	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S	Cl	pH
мг/л	153 ±15	169 ±17	4,0 ±0,4	168 ±17	24,4 ±2,4	5,44 ±0,54	57,0 ±5,7	32,7 ±3,3	1,01 ±0,1	6,4 ± 0,1

Обработка результатов. Для каждого варианта в эксперименте массу полученной продукции вычисляли как среднее для 4 выборок по 6 растений каждая (Morozov et al, 2018), а ошибку рассчитывали по t-критерию Стьюдента для доверительной вероятности $P > 0,95$.

Таблица 4.5. Масса растений салата сорта «Московский парниковый» в зависимости от степени минерализации человеческих экзометаболитов, г на 1 растение (Тихомиров и др., 2016)

Варианты	Сырая масса, г		Сухая масса, г	
	надземная	растения	надземная	растения
Вариант 1	7,10±0,04	8,79±0,02	0,578±0,003	0,686±0,003
Вариант 2	18,43±0,09	20,58±0,05	1,277±0,006	1,419±0,008
Контроль	28,25±0,35	33,36±0,23	1,812±0,022	2,067±0,024

Из таблицы 4.5 можно заключить, что продуктивность растений Салата в эксперименте в Варианте 1 составляла $13,9 \text{ г} / (0,155 \text{ м}^2 * 25 \text{ суток}) = 3,59 \text{ г/м}^2$ в сутки, а в Варианте 2 составляла $30,7 \text{ г} / (0,155 \text{ м}^2 * 25 \text{ суток}) = 7,92 \text{ г/м}^2$ в сутки сухой съедобной биомассы соответственно. Это вызвано тем, что элементы минерального питания биодоступность которых была повышена, составляя относительно небольшую долю массы экзометаболитов, были лимитирующими для минерального питания культурных растений на гидропонике (Morozov et al, 2018).

Исследования показали (Тихомиров и др., 2016), что при доокислении осадка в смеси HNO₃ и H₂O₂ в молярном соотношении 1:1 переходило в раствор значительное количество минеральных

элементов. Увеличение в питательном растворе концентрации питательных элементов, необходимых для роста растений, привело к увеличению сырой и сухой надземной массы салата соответственно в 2,6 и 2,2 раза (табл. 4.4 и рис. 4.2), что сократило разрыв с контрольными значениями от более чем 3-х до 1,5 раз. Приведены данные химических анализов (см. табл. 4.6), выращенных во всех трех вариантах образцов листовой продукции растений салата, выбранных в качестве тест-объектов (Morozov et al, 2018).

Таблица 4.6. Суммарное содержание элементов и соединений в общей сухой биомассе растений Салата контрольного и опытных вариантов при разной степени минерализации экзометаболитов (24 целых растения на вариант (ошибка в пределах $\pm 10\%$):

мг	B	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Mo	Na	N	P	S	Zn	Cl	Углев оды	Лип иды	Сыр. белок
Вариант1	1,02	139	0,22	4,47	714	78	0,61	0,05	237,7	316	135	67,0	0,61	473,2	2040	312	1978
Вариант2	1,38	290	0,35	9,28	1779	136	1,59	0,07	332,0	824	191	139,9	1,08	1052,9	6453	689	5149
Контроль	1,41	616	0,57	14,09	2666	242	1,27	0,27	78,8	1281	333	138,5	1,44	60,6	10644	956	8004

Из таблицы 4.6 было рассчитано, что растения в Варианте 2 не только в 2,2 раза превосходили по продуктивности съедобной биомассы Вариант 1, но еще и примерно в 1,5 раза превосходили по концентрации углеводов и в 1,2 раза по концентрации белков.

Изучена динамика окисления воскообразного остатка (осадок 2) в почвоподобном субстрате (ППС) (см. табл.4.9) и проанализированы газообразные продукты от сжигания осадка 2 в пламени.

Таблица 4.9. Содержание макроэлементов и железа в ППС (Тихомиров и др., 2010) (ошибка не более $\pm 10\%$ от измеряемой величины)

Образец	N			Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S
	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	органический							
ППС, мг/г сухого субстрата	4,2	0,01	26,3	72,5	4,5	13,8	7,2	1,47	8,7	5,6
Доступно* для растений в ППС, %	13,8			95,4	8	95,2	91,2	52	65,1	86,7

* доступность элементов в ППС определяли водной и слабокислой вытяжками из ППС

Важным фактором в эксперименте по окислению воскообразного остатка (осадок 2) с помощью микрофлоры ППС были корневые экссудаты, в то время как производство салата не было главной целью. После 1ой вегетации, масса воскообразного остатка (осадка 2) с проникшим в него ППС уменьшилась в среднем на $0,10 \pm 0,05$ г и стала равной в среднем $0,90 \pm 0,05$ г, причем разница между уменьшением массы осадка 2, размещенного на 50 мм и 15 мм внутри от поверхности ППС, достоверно не отличалась (Morozov et al, 2018). После 2ой вегетации, масса тех же образцов воскообразного остатка (осадка 2) с проникшим в него ППС уменьшилась еще в среднем на $0,22 \pm 0,05$ г и стала равной $0,68 \pm 0,05$ г, разница между уменьшением массы осадка 2 помещенного на разную глубину от поверхности ППС так же достоверно не отличалась (Morozov et al, 2018). Масса воскообразного остатка (осадка 2) составляла менее 1/3 массы осадка 1, образующегося в результате начального «мокрого сжигания» экзометаболитов людей. Концентрации минеральных элементов в нем были примерно в три раза ниже (таблицы 4.1 и 4.2)

Все зарегистрированные компоненты Газа 1 (см. таблицу 4.10) получаемого при доокислении Осадка 1 в смеси HNO₃ и H₂O₂ 1:1 (Morozov et al, 2018a) могут быть переработаны в безопасные соединения и вовлечены в круговорот БТСЖО ранее известными способами (Tikhomirov et al., 2012; Tikhomirov et al., 2011b; Morozov et al, 2018a).



Рисунок 4.2. Корни растений салата в ППС плотно опутывают и проникают через пластинки ПВХ с осадком **2** (Morozov et al, 2018)

Таблица 4.10. Летучие компоненты в газах, собранных от доокисления **осадка 1** в растворе $\text{HNO}_3+\text{H}_2\text{O}_2$ 1:1 и сжигания воскообразного **осадка 2** в пламени (Morozov et al, 2018)

Соединение	Газ 1 от доокисления осадка 1 в растворе $\text{HNO}_3+\text{H}_2\text{O}_2$ 1:1	Газ 2 от сжигания воскообразного осадка 2 в пламени	Метод
O_2	52,6%	18,8%	Gas analyser Witt
CO_2	537 ppm	*>20000+ ppm	Li-COR 840 *(превышен предел)
CO	614 ppm	262 ppm	Teledyne model T300
NO	7,6 ppb	390,7 ppb	Teledyne model T200
NO_2	3,4 ppb	28,4 ppb	Teledyne model T200
NO_x	11,0 ppb	419,1 ppb	Teledyne model T200
NH_3	н.о.		Улавливание NH_3 в растворе H_2SO_4
CH_4	630 ppm	76 ppm	Gamma 100
SO_2, SO_x	н.о.	185,9 ppm	Улавливание S в растворе Na_2CO_3
H_2O	5,5 ppt	20,9 ppt	Li-COR 840

Аммиак NH_3 улавливают в 6% растворе HNO_3 , после чего подвергают нитрификации ранее известными методами (Isurova et al., 2009) для получения солей и/или растворов азотных удобрений. Угарный газ CO, водород H_2 , метан CH_4 , спирты, альдегиды, и летучие углеводороды $\text{C}_2 - \text{C}_6$ из реакторного газа доокисляют на платиново-паладиевом катализаторе до безопасных CO_2 и H_2O (Tikhomirov et al., 2011b; Tikhomirov et al., 2012) для дальнейшего внесения в атмосферу БТСЖО. Окислы азота так же доокисляют на платиново-паладиевом катализаторе, после чего NO_x многократно барботируют через столб водных растворов, получая азотную кислоту, с помощью которой осуществляется улавливание NH_3 , процесс доокисления Осадка **1**, и некоторые другие процессы БТСЖО. Получающиеся после использования в выше описанных процессах улавливания NH_3 и докисления осадков растворенные соли азотной кислоты хорошо усваиваются культурными растениями на гидропонике (Tikhomirov et al., 2011b). Выращивание культурных растений на подобных реакторных газах, переработанных выше описанным образом было продемонстрировано ранее (Tikhomirov et al., 2012), и показало хорошие результаты: продуктивность растений в закрытых камерах с переработанным реакторным газом была примерно на 14% выше чем в контрольном варианте (Tikhomirov et al., 2011b; Tikhomirov et al., 2012), что объясняется повышенной концентрацией CO_2 .

Однако Газ 2 от сжигания в открытом пламени воскообразного остатка (осадка 2) содержат в значительных количествах такие ядовитые для людей газы как окислы серы. Поэтому микробиологическое окисление осадка 2 в ППС предпочтительнее, чем сжигание в пламени. Разработанный технологический процесс доокисления осадка 1 в растворе $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ в молярном соотношении 1:1 с целью повышения биодоступности ряда элементов минерального питания для культурных растений на гидропонике (Morozov et al, 2018) вполне вписывается в БТСЖО космического назначения, имея приемлемый газовый состав на выходе (таблица. 4.10).

Таким образом, разработана методика и научные основы технологического процесса, позволяющие из труднорастворимого осадка, образующегося после физико-химического окисления человеческих экзометаболитов, перевести в растворимое состояние большую часть содержащихся в нем минеральных элементов. Показано, что высвободившиеся из осадка минеральные элементы легко включаются в круговоротный процесс, так как на приготовленных с их использованием питательных растворах продуктивность растений приближается к контролю, где использовали стандартные растворы Кнопа (Тихомиров и др., 2016; Morozov et al, 2018).

В результате, показана принципиальная возможность полного вовлечения достаточно технологичными и эффективными способами (Morozov et al, 2018) продуктов переработки экзометаболитов людей на основе комплекса оригинального метода «мокрого сжигания» биоотходов в водном растворе H_2O_2 активируемой переменным электрическим током и биотехнологии ППС для утилизации несъедобной растительной биомассы, разрабатываемых в ИБФ СО РАН, в биотический круговорот высокозамкнутых БТСЖО космического назначения.

Глава 5. Доокисление осадков от минерализации рыбных отходов, баланс элементов и замкнутость круговорота

Космонавтам рекомендуется помимо белка бобовых культур потреблять так же значительную долю животных белков (Добровольский Агуреев, 2018), исходя из обеспечения рациона дающего повышенную устойчивость к радиации. Поэтому, во многих вариантах конфигураций перспективных высокозамкнутых БТСЖО для длительных космических полетов, предполагается выращивание рыб которые питаются отходами и не конкурируют за пищу с людьми, при этом обеспечивая некоторый % животных белков в рационе космонавтов. Поэтому стоит задача вовлечения богатых кальцием рыбных отходов в биотический круговорот БТСЖО.

Изначальную минерализацию рыбных отходов осуществляли в лабораторном реакторе с рабочим объемом 1,25 л (соотношение компонентов: сухих рыбных отходов - 19,2 г, нативного кала - 57,7 г, урины - 577 мл, H_2O_2 (36 %) - 596 мл) (см. таблицу 2.1). Предварительные исследования показали, что минерализация рыбных отходов происходит много более эффективно совместно с легкоокисляемой органикой, а именно — экзометаболитами людей. Были испытаны два режима минерализации данных растворов — ускоренный и стандартный. Стандартный оказался предпочтительнее, поскольку обеспечил снижение массы осадков и ХПК.

Таблица 5.2. Распределение минеральных макроэлементов и железа в продуктах совместной переработки рыбных отходов и экзометаболитов людей, % (Tikhomirova et al, 2019)

Продукт минерализации	Ca	Fe	K	Mg	Na	N	P	S
Супернатант 3	0,7 ±0,1	1,1 ±0,1	95,8 ±9,6	18,2 ±1,8	94,8 ±9,5	90 ±9	18,1 ±1,8	95,9 ±9,6
Осадок 3	99,3 ±9,9	98,9 ±9,9	4,2 ±0,4	81,8 ±8,2	5,2 ±0,5	10 ±1	81,9 ±8,2	4,1 ±0,4

Рассматривая степень выхода минеральных элементов в раствор (табл. 5.2), видно, что такие элементы как Ca, Fe, Mg и P в основной массе (от 80 до 90 %) находятся в осадке. Разработанная

технология доокисления осадков в $H_2O_2 + HNO_3$ оказалась еще более эффективна для вовлечения в круговорот богатых Са рыбных отходов, обеспечив высокую степень растворения (см. табл. 5.3).

Таблица 5.3. Распределение минеральных макроэлементов и железа в продуктах переработки после повторной минерализации осадка, % (Tikhomirova et al, 2019)

Продукт минерализации	Ca	Fe	K	Mg	Na	N	P	S
Супернатант 3	0,7 ±0,1	1,1 ±0,1	95,8 ±9,6	18,2 ±1,8	94,8 ±9,5	89 ±9	18,1 ±1,8	95,9 ±9,6
Вытяжка из Осадка 3	94,4 ±9,4	83,0 ±8,3	4,0 ±0,4	78,6 ±7,9	5,0 ±0,5	10 ±1	78,5 ±7,9	3,9 ±0,4
Конечный Осадок 4	4,9 ±0,5	15,9 ±1,6	0,2 ±0,1	3,2 ±0,3	0,2 ±0,1	1 ±0,1	3,4 ±0,3	0,2 ±0,1

Для проверки степени усвоения минеральных элементов при совместной минерализации экзометаболитов людей с рыбными отходами и доокислением осадка, выращивали растения пшеницы на гидропонике (Tikhomirova et al, 2019). В контроле использовали только минерализованные экзометаболиты людей, в опыте — минерализованные экзометаболиты людей с рыбными отходами, составы которых приведены в табл. 5.4. Измеряли концентрации питательных элементах в поливных растворах в ходе эксперимента, и в самих растениях пшеницы, а так. Же $K_{хоз}$, массу 1000 зерен, видимый фотосинтез, темновое дыхание, и иные параметры.

Таблица 5.4. Содержание минеральных элементов в минерализованных отходах и сухой биомассе пшеницы, г (ошибка не превышает ±10% от измеряемой величины) (Tikhomirova et al, 2019)

Образцы	Ca	K	Mg	Na	P	S	N
Минерализованные экзометаболиты и рыбные отходы, мг/л	755	1071	182	1212	924	313	5720
Минерализованные экзометаболиты, мг/л	269	1000	103	1200	429	225	5000
Экстракт соломы, мг/л	350	1550	200	316	37	85	127
Суточные потребности ценоза пшеницы, мг	159	533	79	-	105	63	502
500 мл корректирующего раствора опыт	276	655	96	382	268	115	1467
500 мл корректирующего раствора контроль	155	638	76	379	144	93	1287

Использование раствора, содержащего минерализованные экзометаболиты людей и рыбные отходы, как основы минерального питания растений, позволяет получить высокий урожай пшеницы, не уступающий урожаю при выращивании на растворах, приготовленных на основе жидких продуктов минерализации экзометаболитов людей. В последнем случае экономятся значительные количества Са, Mg, P из солей (Tikhomirova et al, 2019). При этом съедобная биомасса растений пшеницы по качеству, минеральному и биохимическому составу также не уступает зерну растений, выращенных на растворе с добавлением только минерализованных экзометаболитов людей (Tikhomirova et al, 2019).

Оценивали баланс элементов минерального питания в экспериментах по доокислению осадков, и повышение степени доступности каждого элемента минерального питания растений.

Так же теоретически рассчитывали замкнутость массообмена БТСЖО на примере эксперимента БИОС-3 в котором была достигнута наибольшая замкнутость, но с использованием

комплекса новых технологий переработки биоотходов. При переработке осадков экзометаболитов людей она составляла порядка 96,4 %, в случае культивации рыб — 99,4 %.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе анализа потоков вещества и степени замкнутости массообмена в зависимости от набора и структуры звеньев в ЗБТСЖО различной сложности предложена схема комплексной технологии утилизации биоотходов (на примере продуктов жизнедеятельности людей) с применением комплекса физико-химических и биотехнологических методов.

2. Определены оптимальные параметры каталитического процесса «мокрого сжигания» биоотходов, включающие применение смеси $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HNO}_3$ в молярном соотношении 1:1 и замену формы тока с 50 Гц синусоиды на 35 Гц меандр, повышающих интенсивность разгона реакции в 2 раза при сокращении общих затрат электроэнергии и времени на 17-18% на весь процесс; на этой основе разработана эффективная технология, обеспечивающая 87-99%-ый перевод в растворимую форму и многократное увеличение количества доступных элементов минерального питания для растений на гидропонике, являвшихся ранее тупиковым отходом.

3. Экспериментально проанализирован объем и состав газов выделяющихся в ходе разработанного процесса утилизации тупиковых продуктов биоотходов с применением HNO_3 , и сделан вывод что их можно переработать и вовлечь в круговорот уже используемыми в БТСЖО методами.

4. С использованием полученных растворов минеральных микро- и макроэлементов модифицированы повышающие продуктивность растений на гидропонике питательные среды; на примере салата листового сорта «Московский парниковый» показана эффективность применения разработанных сред, положительно влияющих на физиологические характеристики растений, их рост и развитие, обеспечивших увеличение продуктивности и съедобной биомассы более, чем в 2,2 раза (с 3,59 г/м² до 7,92 г/м² в сутки), что сопоставимо с показателями в контроле на стандартных средах.

5. Создана система автоматического мониторинга и компьютерного контроля в режиме реального времени основных параметров процесса каталитической минерализации биоотходов (давления, напряжения, температуры, тока), обеспечивающая безопасное и стабильное протекание технологического процесса при сокращении затрат труда и времени операторов на 3 человеко-часа в сутки.

6. Разработанный биопроцесс минерализации воскообразных осадков микробиоценозом ППС протекает с ускорением и дополняет метод каталитического «мокрого сжигания», позволяя вовлечь трудноутилизируемый воскообразный тупиковый осадок в круговорот БТСЖО.

7. Установлено эффективное доокисление осадков от совместной минерализации экзометаболитов людей и рыбных отходов, в результате чего в раствор выходит до 95% Са, и большинство других труднорастворимых элементов, что благоприятно сказывается на продуктивности растений пшеницы достоверно не отличающейся от контроля, позволяет повышать замкнутость БТСЖО и экономить минеральные соли.

8. Комплексное применение физико-химических и биотехнологических методов для утилизации и трансформации биоотходов обеспечило возможность снижения массы не минерализованных тупиковых отходов на 6,327 кг в год на человека в случае минерализации только экзометаболитов людей и на 7,117 кг в год на человека в случае культивации рыб в БТСЖО в пересчете на члена экипажа. На основании этого была показана теоретическую возможность повышения замкнутости круговорота веществ БТСЖО до 96,4% в случае переработки только экзометаболитов и 99,4% в случае культивации рыб в БТСЖО, при более чем двукратном увеличении продуктивности исследованных культур высших растений в условиях замыкания массообмена.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах Перечня ВАК:

1. Морозов Е.А., Трифонов С.В., Куденко Ю.А., Тихомиров А.А. Исследование влияния частоты и формы тока в растворе на распад H_2O_2 при минерализации органических отходов в замкнутых системах жизнеобеспечения. Вестник СибГАУ 2014, Том 1 (53), сс. 164-168.
2. Салтыков М.Ю., Морозов Е.А., Трифонов С.В., Мурыгин А.В., Тихомиров А.А. Компьютерная автоматизация установки "мокрого сжигания" органических отходов для замкнутых экосистем. Вестник СибГАУ 2016, Том 7 №2, сс.438-443.
3. Морозов Е.А., Трифонов С.В., Салтыков М.Ю., Мурыгин А.В., Тихомиров А.А. Подсистема физико-химических реакторов минерализации отходов для биолого технических систем жизнеобеспечения космического назначения. Сибирский журнал науки и технологии 2017, Том 18, № 3, сс. 585-591.
4. Трифонов С.В., Морозов Е.А., Мурыгин А.В., Тихомиров А.А. Разработка технологии минерализации рыбных отходов в реакторе «мокрого» сжигания для ЗЭС космического назначения. Сибирский журнал науки и технологии 2017, Том 18, № 4, сс. 949-955.
5. Морозов Е. А., Трифонов С. В., Мурыгин А. В., Тихомиров А. А. Автоматическая система контроля концентраций O_2 и H_2 в технологических газовых контурах биотехнических систем жизнеобеспечения космического назначения. Сибирский журнал науки и технологий 2018, Том 19, № 4, сс. 691–697.

Статьи в ведущих иностранных рецензируемых журналах Scopus / Web of Science:

6. Morozov Ye.A., Trifonov S.V., Kudenko Yu.A., Tikhomirov A.A. The effects of the frequency and waveform of the activating current on physicochemical oxidation of organic wastes. Life Sciences in Space Research, Vol. 5, April 2015, pp. 53-56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lssr.2015.04.005>
7. Tikhomirov A.A., Trifonov S.V., Morozov E.A., Kudenko Yu.A., Kalacheva G.S., Ushakova S.A. Development of human exometabolites deep mineralization method for closed ecosystems. Doklady Akademii Nauk, 2016, Vol. 470, No. 1, pp. 102–104. <https://dx.doi.org/10.1134/S1607672916050021>
8. Morozov Ye.A., Trifonov S.V., Ushakova S.A., Anishchenko O.V., Tikhomirov A.A. Feasibility of incorporating all products of human waste processing into material cycling in the BTLSS. Life Sciences in Space Research, Vol. 18, 2018, pp. 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2018.05.002>
9. Ushakova S.A., Tikhomirova N.A., Velichko V.V., Trifonov S.V., Morozov Ye.A., Kalacheva G.S., Pavlova A.M., Tikhomirov A.A. Analysis of the gas exchange and water balance in a closed experimental model of the artificial ecosystem intended for an estimated portion of a human. Acta Astronautica, Vol. 152, 2018, pp. 105-111. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.07.022>
10. Tikhomirova N.A., Trifonov S.V., Ushakova S.A., Morozov Ye.A., Anisichenko O.V., Tikhomirov A.A. Incorporation of mineralized human waste and fish waste as a source of higher plant mineral nutrition in the BTLSS mass exchange. Life Sciences in Space Research, 2019, Vol. 20, pp. 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2018.12.003>
11. Trifonov S.V., Morozov Ye.A., Kozlova T.A. Processing of household waste in the BTLSS using the wet combustion method. Life Sciences in Space Research, Vol. 21, 2019 pp. 22-24. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2019.02.003>
12. Trifonov S. V., Velichko V. V., Tikhomirova N. A., Shikhov V. N., Morozov Ye. A. & Tikhomirov A. A. (2020). Deep Physical-Chemical Purification of Gas Medium in Artificial Ecosystems. Doklady Biochemistry & Biophysics Vol. 492, pp. 112–116. <https://doi.org/10.1134/S1607672920030059>

Остальные публикации:

1. Morozov Ye.A., Trifonov S.V., Kudenko Yu.A., Tikhomirov A.A. “Effect of electric current frequency and form on physicochemical oxidation of organic wastes”. 40th COSPAR Scientific Assembly, F4.2 Oral report #12749. Moscow, 2014.

2. Тихомиров А.А., Куденко Ю.А., Ушакова С.А., Трифонов С.В., Морозов Е.А. Перспективы использования новых технологий для создания экспериментальной модели высокозамкнутой системы жизнеобеспечения. Наука и образование: проблемы и перспективы развития. Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции 30 августа 2014 г. Часть 3, с. 126-131. Тамбов, 2014.
3. Морозов Е.А., Трифонов С.В. Автоматизация и оптимизация процесса физико-химической переработки отходов в СЖО. Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы авиации и космонавтики», с. 338-339, СибГАУ, 8-12 апреля 2014.
4. Морозов Е.А., Трифонов С.В. Разработка, компьютерная автоматизация и мониторинг цепочки реакторов физико-химической переработки отходов для БТСЖО космического назначения. III международная научно-практическая конференция, посвященная дню космонавтики «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (10 - 14 апреля 2017), СибГАУ им. Ак. Решетнева, г. Красноярск, Том 2, сс. 161-164. <https://disk.sibsau.ru/index.php/s/rDoxvYXJXHWSgZM>
5. Morozov Ye. A., Trifonov S.V., Ushakova S.A., Anishchenko O.V., Tikhomirov A.A. Full inclusion feasibility of human metabolites' products into BTLSS matter turnover. 68th International Astronautical Congress, A1.7 Oral report #38662. Adelaide, 2017.
6. Morozov Ye.A., Trifonov S.V., Velichko V.V., Tikhomirov A.A. "Abiogenic O₂ cycle loop in BTLSS". 42nd COSPAR Scientific Assembly, F4.5 oral report #22680. Pasadena, CA, 2018.
7. Trifonov S.V., Tikhomirov A.A., Ushakova S.A., Tikhomirova N.A., Morozov Ye.A., (2018b) "Approbation of a physical-chemical method of atmosphere purification in CLSS experimental model". 42nd COSPAR Scientific Assembly, F4.2 oral report #23786. Pasadena, CA, 2018.
8. Tikhomirov A.A., Ushakova S.A., Trifonov S.V., Tikhomirova N.A., Velichko V.V., Morozov Ye.A., Pavlova A.M. "Key technologies for increasing the closedness of experimental models of artificial space ecosystems". 43rd COSPAR Scientific Assembly, F4.1 oral report #25449. Sydney, Australia, 2020.
9. Trifonov S.V., Morozov Ye.A., Tikhomirov A.A. "Improving the efficiency of physical-chemical oxidation of human exometabolites to increase the closure of the artificial ecosystem". 43rd COSPAR Scientific Assembly, F4.1 oral report #25767. Sydney, Australia, 2020.

Патенты:

1. Морозов Е.А., Трифонов С.В., Куденко Ю.А., Тихомиров А.А., Дегерменджи А.Г. "Устройство оптимизированной утилизации отходов жизнедеятельности человека и несъедобной биомассы растений, приводящее к получению из них удобрений". Патент № 146378, Россия, No 2014115901/13, заявл. 21.04.2014, опубл. 10.10.2014, Бюл. №28 – 4 с.