<https://doi.org/10.33266/2070-1004-2021-3-73-80>
УДК 57.081.23(211)

Оригинальная статья
© ФМБЦ им.А.И.Бурназяна

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ АВТОНОМНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ УСЛОВИЙ АРКТИКИ И КРАЙНЕГО СЕВЕРА

И.В.Маркин¹, Е.С.Щелканова¹, Р.А.Володяшкин¹, Е.А.Журбин¹, А.Я.Фисун¹

¹ ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

Резюме. Цель исследования – сравнительный анализ реализованных проектов замкнутых экологических систем и создание на их основе собственной схемы автономного комплекса жизнеобеспечения для условий Арктики и Крайнего Севера.

Материалы и методы исследования. Объект исследования – реализованные проекты замкнутых экологических систем. Предмет исследования – принципы конфигурации подобных проектов, их основные компоненты и взаимосвязь между ними.

Результаты исследования и их анализ. Проанализированы созданные в разное время системы жизнеобеспечения, назначением которых являлось использование в длительных космических полетах или проведение фундаментальных экологических исследований. Показано, что подобные проекты были основаны на использовании биологических систем, что говорит о возможности их применения для обеспечения автономности инфраструктуры в районах Арктики и Крайнего Севера. Предложена схема планируемого к разработке комплекса, позволяющего перерабатывать отходы жизнедеятельности, удовлетворять потребности людей в питании, производить биотопливо третьего поколения.

Ключевые слова: биотопливо, микроводоросли, предлагаемый проект системы жизнеобеспечения, проект БИОС, проект БИОСФЕРА-2, проект МЕЛИССА, районы Арктики и Крайнего Севера, системы жизнеобеспечения

Конфликт интересов. Авторы статьи подтверждают отсутствие конфликта интересов

Для цитирования: Маркин И.В., Щелканова Е.С., Володяшкин Р.А., Журбин Е.А., Фисун А.Я. Перспективы создания автономных комплексов жизнеобеспечения с использованием биологических систем для условий Арктики и Крайнего Севера // Медицина катастроф. 2021. №3. С. 73-80.
<https://doi.org/10.33266/2070-1004-2021-3-73-80>

<https://doi.org/10.33266/2070-1004-2021-3-73-80>
UDC 57.081.23(211)

Original article
© Burnasyan FMBC FMBA

PROSPECTS FOR CREATION OF AUTONOMOUS LIFE SUPPORT COMPLEXES USING BIOLOGICAL SYSTEMS FOR ARCTIC AND FAR NORTH CONDITIONS

I.V.Markin¹, E.S.Shchelkanova¹, R.A.Volodyashkin¹, E.A.Zhurbin¹, A.Ya.Fisun¹

¹ Military innovative technopolis "ERA", Anapa, Russian Federation

Abstract. The purpose of the study is a comparative analysis of the implemented projects of closed ecological systems and the creation on their basis of own scheme of autonomous life-support complex for the conditions of the Arctic and the Far North. **Materials and methods of research.** The object of the study is implemented projects of closed ecological systems. The subject of the study is the principles of configuration of such projects, their main components and the relationship between them. **Research results and their analysis.** The support systems created at different times, with the purpose to be used in long-duration space flights or to carry out fundamental ecological research, were analyzed. Such projects were based on the use of biological systems, which opens the possibility of their use to ensure the autonomy of infrastructure in the Arctic and Far North. The scheme of the complex planned for development is proposed. This complex allows to recycle waste products, meets human nutritional needs and produces biofuel of the third generation.

Key words: Arctic and Far North areas, biofuel, BIOSPHERA-2 project, life support systems, MELISSA project, microalgae, project, proposed life support system BIOS project

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest

For citation: Markin I.V., Shchelkanova E.S., Volodyashkin R.A., Zhurbin E.A., Fisun A.Ya. Prospects for Creation of Autonomous Life Support Complexes Using Biological Systems for Arctic and Far North Conditions. *Meditsina katastrof* = Disaster Medicine. 2021;3:73-80 (In Russ.). <https://doi.org/10.33266/2070-1004-2021-3-73-80>

Контактная информация:

Щелканова Елена Сергеевна – кандидат биологических наук; начальник лаборатории аддитивных технологий и профессиональной надежности
Адрес: Россия, 353456, Анапа, Пионерский пр-т, 41
Тел.: +7(921) 668-55-27
E-mail: shchelkanova_el@mail.ru

Contact information:

Elena S. Shchelkanova – Cand. Sc. (Biol.); Head of the Laboratory for Additive Technologies and Professional Reliability
Address: 41, Pionerskiy avenue, Anapa, 353456, Russia
Phone: +7 (921) 668-55-27
E-mail: shchelkanova_el@mail.ru

Арктическая зона Российской Федерации (далее – Арктическая зона, Арктика) играет большую роль в развитии страны: в ней создаётся 12–15% валового внутреннего продукта (ВВП) России, она обеспечивает около четверти ее общего экспорта [1].

В Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г. указаны причины, обуславливающие значение Арктической зоны:

- доля региона в добыче природного газа и нефти в Российской Федерации составляет 80 и 17 % соответственно;
- Арктическая зона является площадкой для реализации крупных инвестиционных проектов и обеспечивает формирование спроса на высокотехнологичную продукцию;
- континентальный шельф Российской Федерации в Арктике представляет собой стратегический резерв развития минерально-сырьевой базы России;
- в Арктической зоне расположены объекты стратегических сил сдерживания в целях недопущения агрессии против Российской Федерации и её союзников*.

Следует отметить, что Арктика, будучи ценной ресурсно-сырьевой базой, является возможной зоной конфликтов интересов разных стран, что приводит к необходимости создания там военных баз и усиления присутствия Вооруженных Сил (ВС) Российской Федерации. Военная инфраструктура региона служит не только для защиты гражданских структур, но и в качестве опорной точки развертывания ВС.

Освоение Арктики и решение военных задач связано с определенными трудностями, возникающими, главным образом, из-за ее сурового климата, ограниченной транспортной доступности, низкой плотности населения [2]. Среди основных факторов, формирующих риски развития Арктики и обеспечения национальной безопасности страны, можно назвать следующие:

- отсутствие государственной поддержки завоза топлива, продовольствия и других жизненно необходимых товаров в отдаленные населенные пункты, а также низкий уровень развития транспортной инфраструктуры;
- высокая доля локальной генерации электроэнергии на основе экономически неэффективного и экологически небезопасного дизельного топлива;
- слабое взаимодействие сектора научных исследований и разработок с реальным сектором экономики, разомкнутость инновационного цикла;
- рост конфликтного потенциала в Арктике, требующий постоянного повышения боевых возможностей группировок войск (сил) ВС Российской Федерации, других войск, воинских формирований и органов в Арктической зоне.

Принимая во внимание обозначенные выше проблемы, можно предположить, что перспективным инструментом для развития территорий Арктики и Крайнего Се-

вера могут быть биологические системы жизнеобеспечения, способные производить еду и топливо, обеспечивать комфортные условия проживания личного состава на военных базах, а также, в качестве наукоёмкого проекта – способствовать развитию инновационного сектора экономики. Важность использования таких технологий при освоении Арктики подчеркивают многие российские ученые, в частности, президент НИЦ «Курчатовский институт» М.В.Ковальчук [3]. Рассмотрим более подробно их виды, характеристики и свойства, которые являются полезными для обеспечения непрерывной работы людей в зонах Арктики и Крайнего Севера.

Цель исследования – сравнительный анализ существующих проектов замкнутых экологических систем и создание на их основе собственной схемы автономного комплекса жизнеобеспечения для условий Арктики и Крайнего Севера.

Материалы и методы исследования. Объект исследования – существующие проекты замкнутых экологических систем. Предмет исследования – принципы конфигурации подобных проектов, их основные компоненты и взаимосвязь между ними.

Результаты исследования и их анализ.**Общая характеристика систем жизнеобеспечения**

Системы жизнеобеспечения представляют собой комплекс оборудования, предназначенного для обеспечения выживания человека в условиях враждебной окружающей среды, например, в космосе, под водой, под землей или в пустынных районах [4].

Автономные комплексы, обеспечивающие регенерацию жизненно необходимых ресурсов, называются системами закрытого контура. При их использовании первоначальный запас ресурсов помещается в систему, после чего происходит непрерывный процесс их регенерации [5].

В зависимости от процессов, лежащих в основе систем закрытого контура, они делятся на физико-химические и биологические, а также гибридные, включающие черты первых и вторых. Физико-химические процессы включают в себя использование фильтров, методов физического или химического разделения веществ, процессов концентрации и др. Биологические процессы основаны на использовании способностей таких живых организмов, как растения или бактерии, создавать или разрушать различные органические молекулы. Первые применявшиеся системы жизнеобеспечения были основаны на использовании физико-химических методов, что обуславливалось их высокой степенью изученности, небольшими размерами приборов, возможностью точно контролировать их работу. С другой стороны, они требуют большого количества дорогостоящей энергии и не способны пополнять запасы еды, которую нужно доставлять извне. Биологические процессы – менее изучены, их сложнее контролировать, при этом главными достоинствами биологических систем закрытого контура являются: более низкие затраты энергии; возможность утилизации углекислоты, сточных вод и регенерации кислорода и воды; получение биотоплива; возмож-

* О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г.: Указ Президента Российской Федерации от 26 октября 2020 г. №645

ное восполнение запасов провизии – выращивание зерновых и овощных культур, разведение некоторых пород домашнего скота и видов рыбы, получение пищевых добавок, в частности, белково-витаминных комплексов (БВК) с радиопротекторным эффектом) [6–9].

Начиная с 60-х гг. XX в., подобные свойства данных систем обусловили повышенный интерес к ним со стороны ученых. Наиболее крупными исследовательскими работами в этой области стали проекты БИОСФЕРА-2, MELiSSA, БИОС-3. Проведем сравнительный анализ структуры и особенностей функционирования каждого из данных проектов.

Проект БИОСФЕРА-2

Самой большой искусственной экосистемой, созданной на данный момент, является проект БИОСФЕРА-2, дизайн которого был направлен на то, чтобы максимально приблизиться к сложному устройству и разнообразию земной экосистемы, для чего были созданы модели множества биомов, включая тропический лес, саванну, океан, пустыню. Цель создания комплекса – обеспечение жизнедеятельности 8 участников эксперимента в течение двух лет [10].

Проект БИОСФЕРА-2 содержал 7 биомов, 2 из которых представляли собой антропогенные экосистемы (жилище человека и сельскохозяйственная зона); оставшиеся 5 – моделировали естественные природные зоны: тропический лес, пустыню, саванну, болото, океан [11].

Поддержание заданной температуры в каждом биоме проводилось за счет систем кондиционирования воздуха, установленных в подвале комплекса. Система вентиляции позволяла управлять потоком кондиционированного воздуха, возвращаемого обратно в комплекс, в зависимости от моделируемого времени суток или сезона [12].

Содержание кислорода в атмосфере БИОСФЕРЫ-2 уменьшалось в течение двух лет эксперимента. Исследования показали, что часть кислорода в виде молекул CO_2 поглощалась бетоном, применявшимся в конструкции комплекса, морской водой и рыхлыми карбонатными почвами [13].

Для очистки воздуха вместо традиционных энерго- и ресурсозатратных методов фильтрации и каталитического окисления использовалась технология почвенного реактора: воздух продувался через слой почвы, в котором функционировало активное микробное сообщество, очищавшее его от различных газов, включая CO , H_2S , SO_2 , NH_3 и др. [13].

В комплексе функционировал полный гидрологический цикл. Водяной пар попадал в атмосферу путем испарения с поверхности почвы и океана, а также благодаря транспирации растений. Конденсат, формирующийся на охлаждающих катушках кондиционеров, затем собирался в желобках, из которых его выкачивали в накопительные цистерны. После сбора конденсированная вода распределялась на нужды комплекса. Отходы, полученные в результате жизнедеятельности человека и сельскохозяйственных животных, обрабатывались при участии микробных и растительных сообществ [10].

Сельскохозяйственный биом БИОСФЕРЫ-2 включал в себя грядки для культивирования растений, несколько затопленных областей для выращивания рыбы и риса, фруктовый сад, а также контейнеры, находившиеся на балконе и в подвале. Для использования в БИОСФЕРЕ-2 были предварительно отобраны сорта растений, устойчивых к болезням и вредителям; всего в комплексе росло 86 разновидностей культур.

БИОСФЕРА-2 была первым проектом подобного рода, в котором использовались сельскохозяйственные животные и птицы – козы, свиньи, курицы – питающиеся в основном теми частями растений, которые являются несъедобными для людей. Они выполняли несколько функций в комплексе: давали молоко, яйца и мясо, служившие важным компонентом питания персонала, а также принимали участие в круговороте веществ, потребляя несъедобные растительные остатки [13].

Проект MELiSSA

Целью проекта Мелисса (Micro-Ecological Life Support System Alternative) является создание модели, позволяющей изучить механизмы функционирования регенеративных систем жизнеобеспечения для их применения в длительных космических миссиях. Концепция функционирования проекта была впервые разработана профессором Mergeau в 1987 г. и с тех пор практически не претерпела изменений [14].

Идея проекта основана на дублировании функций Земной биосферы без использования запасов её ресурсов. В отличие от проекта БИОСФЕРА-2 в проекте MELiSSA не создаются миниатюрные копии уже существующих в природе биомов; наоборот, её биосфера настолько редуцирована, что способна проводить лишь основные биологические процессы, поддерживающие глобальные экологические функции. MELiSSA состоит из 5 компартментов, связанных между собой и формирующих единую закрытую регенеративную систему – рис. 1 [14].

В первом компартменте, представляющем собой анаэробный термофильный биореактор, происходит разложение таких биологических отходов, как несъедобные части растений, отходы жизнедеятельности персонала и т.д. Микробное сообщество данного реактора – достаточно разнообразно, оно включает в себя различные анаэробные термофильные бактерии и микробиоту, содержащуюся в фекальных массах.

Продуктами анаэробной ферментации являются летучие жирные кислоты (ЛЖК), минеральные соли и аммоний, которые направляются во второй компартмент, где под действием солнечного света фотогетеротрофные бактерии *Rhodospirillum rubrum* разлагают ЛЖК до углекислого газа, после чего полученные вещества поступают в третий блок.

Третий компартмент, представляющий собой аэробный биореактор, в котором осуществляется совместное культивирование нитрифицирующих бактерий родов

Рис. 1. Схема функционирования и взаимосвязи отдельных компартментов системы MELiSSA

Fig. 1. Scheme of functioning and interconnection of individual compartments of MELiSSA system

Nitrosomonas и *Nitrobacter*, иммобилизованных на специальных бусах, предназначен для перевода аммонийного азота в окисленную форму нитрата, поскольку в таком виде он может усваиваться высшими растениями и цианобактериями.

Четвертый компартмент состоит из двух частей: в первой части расположен фотобиореактор с культурой фотоавтотрофной цианобактерии *Arthrospira platensis*, предназначенной главным образом для регенерации кислорода и поглощения CO_2 ; во второй – выращиваются несколько культур высших растений (пшеница, салат-латук, свекла), которые являются источником питания и участвуют в обогащении воздуха кислородом. Помимо этого высшие растения способны регенерировать питьевую воду путем транспирации.

Наконец, пятый компартмент представляет собой собственно персонал комплекса, чьи основные потребности обеспечиваются другими компонентами системы. В настоящее время в этой роли выступают лабораторные животные.

Проект БИОС

Первая попытка создания биорегенеративной системы жизнеобеспечения была предпринята в 60-х гг. в СССР на базе Института биофизики РАН в Красноярске. Цель проекта – создание замкнутой системы, позволяющей долгое время имитировать земные условия при длительных космических полетах. БИОС-1 представлял собой систему двух связанных камер: первая – объемом 12 м^3 – предназначалась для проживания человека, во второй находился фотобиореактор объемом 18 л, в котором культивировались микроводоросли *Chlorella vulgaris* [15].

Проведя серию из 7 опытов, ученые смогли добиться полной замкнутости системы по воздуху и 80–85%-ной замкнутости – по воде, кроме того, удалось обеспечить до 20% суточной потребности человека в еде [16].

В 1968 г. было принято решение присоединить к БИОС-1 дополнительный модуль – т.н. фитотрон, предназначенный для выращивания высших растений; созданная установка получила название БИОС-2.

В 1972 г. была создана принципиально новая искусственная экосистема – БИОС-3 (рис. 2). Герметичная конструкция была разделена на 4 отсека. Первый предназначался для проживания персонала из 3 чел. и имел в своем составе спальные места, туалет, кухню, диспетчерскую и рабочую зону. Второй отсек содержал фотобиореактор с микроводорослями, обеспечивавший достаточную регенерацию воздуха для трех участников эксперимента. Оставшиеся 2 отсека были заняты фитотронами, в которых выращивали пшеницу, чуму, овощи [17].

Воздух очищался термokatалитическим фильтром, окислявшим различные органические примеси до углекислого газа и воды. Испарившуюся воду конденсировали и рециркулировали, используя её для приготовления питательных растворов для высших растений. Часть этой воды кипятили и использовали в хозяйственных целях, а также в качестве питьевой воды, для чего её предварительно пропускали через ионно-обменные фильтры. Фекалии высушивались и хранились в отдельном контейнере, а полученные водяные пары возвращались в систему; моча поступала в водорослевый отсек и использовалась при культивировании микроводорослей. Чтобы ещё более полно замкнуть систему, в неё была добавлена печь, предназначенная для сжигания несъедобных частей растительной биомассы [18].

Предлагаемый проект системы жизнеобеспечения

На основе представленных выше проектов предлагается создание комплекса жизнеобеспечения на основе микроводорослей, особенности метаболизма которых позволяют использовать их для выполнения различных функций жизнеобеспечения.

Рис. 2. Схема проекта БИОС-3: В – фотобиореактор, Г – газодувка, У – угольный фильтр, С – сборники сточной воды, Q – коллектор конденсата влаги, Д – емкость для кипячения и хранения питьевой воды, М – коллектор мочи, Ф – узел доочистки питьевой воды

Fig. 2. Schematic diagram of the project BIOS-3: C – photobioreactor, D – gas blower, U – carbon filter, C – waste water collectors, Q – moisture condensate collector, E – potable water boiling and storage tank, M – urine collector, F – potable water additional treatment unit

4. Питательные вещества для культивирования микродорослей, в частности, азот и фосфор, могут быть получены из сточных вод – таким образом возможно совместить производство биотоплива и обработку отходов [25].

Образующийся в процессе фотосинтеза кислород направляется в жилые помещения, высшие растения используются как источник питания, а биомасса водорослей служит для производства БВК, биоэтанола и биотоплива. Отходы человеческой жизнедеятельности

Сравнительная характеристика существующих и проекта предлагаемой системы жизнеобеспечения
Comparative characteristics of existing and proposed life-support system design

Характеристика Characteristics	БИОС-1,2,3 – СССР 1963-1977 BIOS-1,2,3–USSR 1964-1977	БИОСФЕРА –США 1991-1994 BIOSPHERE –USA 1991-1994	MELISSA –Испания 2009 – наст. время MELISSA –Spain 2009 - present	CEEF –Япония 1998–2007 CEEF –Japan 1998-2007	Лунный дворец – Китай 2014 Lunar Palace – China 2014	Предлагаемый проект Proposed Project
Цель	Создание замкнутой системы, позволяющей в течение большого отрезка времени имитировать земные условия при длительных космических полетах	Создание модели земной биосферы для изучения фундаментальных экологических процессов	Изучение механизмов функционирования регенеративных систем жизнеобеспечения для их применения в длительных космических миссиях	Сбор экспериментальных данных для моделирования потоков углерода в биосфере	Создание замкнутой биорегенеративной системы жизнеобеспечения	Создание системы жизнеобеспечения для применения в условиях Арктики и Крайнего Севера
Goal	Creation of a closed system that allows to simulate Earth conditions during long-duration spaceflight within a long period of time	Creation of a model of the Earth's biosphere to study fundamental ecological processes	Study of mechanisms of regenerative life support systems functioning for their application in long-term space missions	Collection of experimental data for modeling carbon fluxes in the biosphere	Creation of a closed bioregenerative life support system	Creation of a life support system for use in the Arctic and Far North
Регенерация воздуха	Выделение O_2 , поглощение CO_2 микроводорослями и высшими растениями; дополнительная очистка термokatалитическими фильтрами	Выделение O_2 , поглощение CO_2 высшими растениями; контроль уровня CO_2 при помощи газоочистительного фильтра; дополнительная очистка с использованием технологии почвенного реактора	Выделение O_2 , поглощение CO_2 высшими растениями и цианобактериями	Выделение O_2 , поглощение CO_2 высшими растениями; обмен CO_2 и O_2 между отдельными модулями через систему обработки газов	Выделение O_2 , поглощение CO_2 высшими растениями; наличие специальной системы очистки, удаляющей следовые газы	Выделение O_2 , поглощение CO_2 высшими растениями и микроводорослями; использование фильтров и других механизмов дополнительной очистки
Air regeneration	O_2 release, absorption of CO_2 by microalgae and higher plants; additional purification by thermocatalytic filters	O_2 release, absorption of CO_2 by higher plants; controlling CO_2 levels with a gas filter; additional cleaning using soil reactor technology	O_2 release, absorption of CO_2 by higher plants and cyanobacteria	O_2 release, absorption of CO_2 by higher plants; exchange of CO_2 and O_2 between individual modules through the gas treatment system	O_2 release, absorption of CO_2 by higher plants; special cleaning system removing trace gases	O_2 release, absorption of CO_2 by higher plants and microalgae; use of filters and other mechanisms of additional purification
Очистка воды	Получение конденсата, его кипячение и очистка ионно-обменными фильтрами	Сбор конденсата, его использование для работы дождевой системы и орошения полей; очистка фильтрами и УФ- излучениями для получения питьевой воды	Сбор конденсата, образуемого при транспирации растений, и его дальнейшая очистка	Сбор конденсата и его использование для приготовления питательного раствора для растений и в качестве питьевой воды	Сбор конденсата из воздуха с его дальнейшей очисткой при помощи мембранных реакторов	Часть воды, очищенной в водорослевом фотобиореакторе, подвергается фильтрации и обеззараживанию для использования в качестве питьевой; другая часть применяется для полива растений в фитотроне
Water treatment	Collection of condensate, boiling and purifying it with ion-exchange filters	Collection of condensate, its use to run the rainwater system and to irrigate the fields; treatment with filters and UV-radiation for drinking water	Collection of condensate formed during transpiration of plants and its further cleaning	Collection of condensate and its use for preparing nutrient solution for plants and as drinking water	Collection of condensate with its further purification using membrane reactors	Part of the water purified in the algae photobioreactor is filtered and disinfected for use as drinking water; the other part is used to water plants in the phytotron

Характеристика Characteristics	БИОС-1,2,3 – СССР 1963–1977 BIOS-1,2,3 – USSR 1964–1977	БИОСФЕРА –США 1991–1994 BIOSPHERE – USA 1991–1994	MELISSA – Испания 2009 – наст. время MELISSA –Spain 2009 - present	CEEФ – Япония 1998–2007 CEEФ – Japan 1998-2007	Лунный дворец – Китай 2014 Lunar Palace – China 2014	Предлагаемый проект Proposed Project
Обработка отходов	Высушивание и хранение твердых человеческих отходов, использование мочи для полива пшеницы, сжигание несъедобных частей растений	Компостирование несъедобных частей растений и навоза животных; обработка отходов человеческой жизнедеятельности при помощи анаэробных баков и аэробных лагун	Разложение отходов в биореакторе с термофильным режимом работы; потребление промежуточных продуктов разложения фотогетеротрофными и нитрифицирующими и бактериями	Обработка отходов при помощи реактора мокрого сжигания наряду с системой химической фиксации азота из атмосферы; пиролиз отходов человеческой жизнедеятельности	Разложение фекалий и несъедобных частей растений в микробном биореакторе; дистилляция мочи и удаление её сухого остатка из системы	Обработка отходов человеческой жизнедеятельности путем очистки микродостройками, компостирования, сжигания в муфельной печи. Несъедобные части растений подвергаются компостированию
Waste treatment	Drying and storing solid human waste, using urine to irrigate wheat, burning inedible plant parts	Composting of inedible plant parts and animal manure; treatment of human waste using anaerobic tanks and aerobic lagoons	Waste decomposition in a bioreactor with a thermophilic mode of operation; consumption of intermediate decomposition products by photoheterotrophic and nitrifying bacteria	Waste treatment using a wet combustion reactor along with a system of chemical fixation of nitrogen from the atmosphere; pyrolysis of human waste	Decomposition of feces and inedible plant parts in a microbial bioreactor; distillation of urine and removal of its dry residue from the system	Treatment of human waste by cleaning with microalgae, composting, incineration in a muffle furnace. Inedible plant parts are composted
Культивирование растений	Выращивание пшеницы, чумы, овощей в фитотронах на искусственном субстрате с применением методов гидропоники	Выращивание растений на грядах, затопленных участках рисовых плантаций, фруктовый сад; всего 86 разновидностей культур	Выращивание пшеницы, салата, лука, свеклы и других культур как на твердом субстрате, так и методом гидропоники	Выращивание методом гидропоники 23 овощных культур, включая рис и соевые бобы	Выращивание 5 видов злаков, 15 видов овощей, одного вида ягод в почвоподобных субстратах	Предлагается выращивание в почве специально отобранных злаковых и овощных культур; использование экзометаболических микроводородослов в качестве стимуляторов роста
Cultivation of plants	Cultivation of wheat, chufa, vegetables in phytotrons on artificial substrate using hydroponic methods	Cultivation of plants on beds, flooded areas for rice plantations, orchard; a total of 86 varieties of crops	Cultivation of wheat, lettuce, beets, and other crops both on solid substrate and hydroponics	Hydroponic cultivation of 23 vegetable crops, including rice and soybeans	Cultivation of 5 types of cereals, 15 types of vegetables, one type of berries in soil-like substrates	It is proposed to grow specially selected cereals and vegetable crops in the soil; to use exometabolites of microalgae as growth stimulators
Разведение животных	Не осуществлялось	Выращивание коз, кур, свиней и рыбы. Яйца, молоко и мясо служили важным источником питания персонала	Не осуществлялось; использовались лабораторные животные	Две козы	Мучные черви, использующиеся в качестве дополнительного источника белка	Не планируется
Animal breeding	Not carried out	Raising goats, chickens, pigs and fish. Eggs, milk and meat were an important source of food for the staff	Not carried out; laboratory animals were used	Two goats	Flour worms used as an additional source of protein	Not carried out

очищаются при помощи микроводорослей, часть из них отправляется в компост или муфельную печь. Очищенные микроводорослями сточные воды подвергаются дополнительной фильтрации и обеззараживанию, после чего используются для обеспечения потребностей персонала в питьевой воде, а не подвергаемая обеззараживанию вода применяется для технических нужд. Культуральная жидкость микроводорослей, содержащая стимуляторы роста, подаётся в систему полива растений фитотрона.

Сравнительная характеристика существующих и проекта предлагаемой системы жизнеобеспечения приведена в таблице.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Российские владения в Арктике. История и проблемы международно-правового статуса // ТАСС. 2019. URL: <https://tass.ru/info/6312329> (дата обращения: 30.11.2020) (In Russ.). [Rossiyskie Vladeniya v Arktike. Istoriya i Problemy Mezhdunarodno-Pravovogo Statusa. TASS. 2019. URL: <https://tass.ru/info/6312329> (Accessed: 30.11.2020)].
2. Торопушина Е.Е. Оценка уровня развития социальной инфраструктуры в регионах Севера и Арктики России // Всероссийский экономический журнал ЭКО. 2016. №6(504) (In Russ.). [Toropushina E.E. Assessment of the Level of Development of Social Infrastructure in the Regions of the North and the Arctic of Russia. All-Russian Economic Journal ECO. 2016;6;504].
3. Природоподобные технологии для нужд Арктики // Международный арктический форум. 2020. URL: <https://forumarctica.ru/news/prirodopodobnye-tehnologii-dlja-nuzhd-arktiki/> (дата обращения: 03.02.2021) (In Russ.). [Prirodopodobnye Tekhnologii dlya Nuzhd Arktiki. Mezhdunarodnyy Arkticheskiy Forum. 2020. URL: <https://forumarctica.ru/news/prirodopodobnye-tehnologii-dlja-nuzhd-arktiki/> (Accessed: 03.02.2021)].
4. Life-Support System. Wikipedia. 2020. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Life-support_system (data obrashcheniya: 03.12.2020).
5. Eckart P. Spaceflight Life Support and Biospherics. Torrance, Microcosm Press, 1996. 444 p.
6. Lehr F., Posten C. Closed Photo-Bioreactors as Tools for Biofuel Production. Current Opinion in Biotechnology. 2009;20:3:280-285.
7. Dempster W.F. Methods for Measurement and Control of Leakage in CELSS and their Application and Performance in the Biosphere 2 Facility. Advances in Space Research. 1994;14;11:331-335.
8. Patras D., Moraru C.V., Socaci C. Screening of Bioactive Compounds Synthesized by Microalgae: a Progress Overview on Extraction and Chemical Analysis. Studia Universitatis Babeş-Bolyai Chemie. 2018;63:21-35.
9. Tamponnet C., et al. Man in Space-A European Challenge in Biological Life-Support. ESA Bulletin-European Space Agency. 1991;67:39-49.
10. Nelson M., Bass E.P., Leigh L. Biosphere 2 and the Study of Human / Ecosystem Dynamics. Humans as Components of Ecosystems. New York, Springer, 1993. P. 280-296.
11. Dempster W.F. Biosphere 2 Engineering Design. Ecological Engineering. 1999;13;1-4:31-42.
12. Severinghaus J.P., et al. Oxygen Loss in Biosphere 2. EOS, Transactions American Geophysical Union. 1994;75;3:33-37.
13. Nelson M., Silverstone S., Poynter J. Biosphere 2 Agriculture: Test Bed for Intensive, Sustainable, Non-Polluting Farming Systems. Outlook on Agriculture. 1993;22;3:167-174.
14. Mergeay M., et al. MELISSA-A Microorganisms-Based Model for CELSS Develop. Proceedings 3rd European Symp. Space Thermal Control and Life Support Systems, Noordwijk. 1987. P. 65-68.
15. Garland J.L. Microbial Functions in Space: Mars Transit to Early Planetary Base Exploration Missions. Acta Astronautica. 2007;60;4-7:518-524.
16. Kirensky L.V., et al. Theoretical and Experimental Decisions in the Creation of an Artificial Ecosystem for Human Life Support in Space. Life Sciences and Space Research. 1971;9:75-80.
17. Gitelson I.I., Lisovsky G.M., MacElroy R.D. Manmade Closed Ecological Systems. London, Taylor & Francis, 2003. 402 p.
18. Salisbury F.B., Gitelson J.I., Lisovsky G.M. Bios-3: Siberian Experiments in Bioregenerative Life Support. BioScience. 1997;47;9:575-585.
19. Becker E. W. Micro-Algae as a Source of Protein. Biotechnology Advances. 2007;25;2: 207-210.
20. Noack R. Energy and Protein Requirements. Report of a Joint FAO/WHO Ad Hoc Expert Committee. WHO Technical Report Series No. 522, 118 S., Genf 1973. Food/ Nahrung. 1974;18;3:329-332.
21. Sathasivam R., et al. Microalgae Metabolites: a Rich Source for Food and Medicine. Saudi Journal of Biological Sciences. 2019;26;4:709-722.
22. Schenk P.M., et al. Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. Bioenergy Research. 2008;1;1:20-43.
23. Dismukes G.C., et al. Aquatic Phototrophs: Efficient Alternatives to Land-Based Crops for Biofuels. Current Opinion in Biotechnology. 2008;19;3:235-240.
24. Chisti Y. Biodiesel from Microalgae. Biotechnology Advances. 2007;25;3:294-306.
25. Cantrell K.B., et al. Livestock Waste-To-Bioenergy Generation Opportunities. Bioresource Technology. 2008;99;17:7941-7953.
26. Rodolfi L., et al. Microalgae for Oil: Strain Selection, Induction of Lipid Synthesis and Outdoor Mass Cultivation in a Low-Cost Photobioreactor. Biotechnology and Bioengineering. 2009;102;1:100-112.
27. Hirano A., et al. CO₂ Fixation and Ethanol Production with Microalgal Photosynthesis and Intracellular Anaerobic Fermentation. Energy. 1997;22;2-3:137-142.
28. Qin J.G. Bio-Hydrocarbon from Algae Impacts of Temperature, Light and Salinity on Algae Growth. A Report for the Rural Industries Research and Development Corporation. Australia, RIRDC Publication. 2005;05;25:7-11.
29. Таутс М.И., Селиванова Т.М., Семенов В.Е. К расшифровке эффекта автостимуляции роста хлореллы // Физиология растений. 1971. Т.18, №1. С. 69-77 (In Russ.). [Tauts M.I., Selivanova T.M., Semenov V.E. K Rasshifrovke Effekta Avtostimulyatsii Rosta Khlorelly. Fiziologiya Rastenii. 1971;18;1:69-77].
30. Faheed F.A., Fattah Z.A. Effect of Chlorella Vulgaris as Bio-Fertilizer on Growth Parameters and Metabolic Aspects of Lettuce Plant. Journal of Agriculture and Social Sciences. 2008;4;4:165-169.
31. Garcia-Gonzalez J., Sommerfeld M. Biofertilizer and Biostimulant Properties of the Microalga Acutodesmus Dimorphus. Journal of Applied Phycology. 2016;28;2:1051-1061.
32. Kholssi R., et al. Biofertilizing Effect of Chlorella Sorokiniana Suspensions on Wheat Growth. Journal of Plant Growth Regulation. 2019;38;2:644-649.
33. Kim M.J., et al. Effect of Biostimulator Chlorella Fusca on Improving Growth and Qualities of Chinese Chives and Spinach in Organic Farm. The Plant Pathology Journal. 2018;34;6:567-575.

Выводы

1. Использование комплексов жизнеобеспечения на основе биологических систем позволит значительно увеличить автономность работы объектов инфраструктуры, расположенных в районах Арктики и Крайнего Севера.

2. Сравнительный анализ показал, что наиболее перспективным является создание комплексов жизнеобеспечения на основе микроводорослей, черты метаболизма которых дают возможность одновременно решать несколько важных задач по обеспечению автономности.

3. Реализация предложенного проекта позволит обеспечивать персонал едой, утилизировать отходы жизнедеятельности, получать биотопливо и ценные пищевые добавки.