

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

Сычев Владимир Николаевич

**БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА – ПРОШЛОЕ,
НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ**

Москва 2021 г.

**Биологическая система жизнеобеспечения человека (БСЖО) – искусственно созданная на ограниченной территории совокупность организмов и абиотических факторов типа биогеоценоза. БСЖО есть функционально единое сообщество, включающее растения, микроорганизмы, животных и человека, существующее в состоянии динамического равновесия на основе относительно замкнутого круговорота веществ»
Е.Я.Шепелев**

Одной из важнейших задач космической биологии и медицины является решение комплекса проблем, связанных с медико-биологическим обеспечением жизнедеятельности человека в экстремальных условиях космического полета. В перечень этих проблем входят и вопросы создания надежных и эффективно работающих систем жизнеобеспечения (СЖО). Исследования в этом направлении являются не менее актуальными, чем создание соответствующих технических средств для освоения космического пространства человеком.

Работы по созданию СЖО, в том числе и на основе биологического круговорота веществ, начались одновременно с созданием технических средств для полетов человека в космос. Пионеры космонавтики опирались на идеи К.Э.Циолковского, Ф.А.Цандера, которые на основе работ К.А.Тимирязева предполагали использовать процесс фотосинтеза растений для обеспечения газообмена человека. В 1961 году была предпринята первая попытка реализовать биологическую систему жизнеобеспечения (БСЖО) на основе фотосинтеза одноклеточных водорослей. Был проведен эксперимент, в котором испытатель в течение суток жил в гермообъеме, атмосфера которого создавалась за счет фотосинтеза одноклеточных водорослей. Этим испытателем был **Евгений Яковлевич Шепелев**, много лет руководивший работами по созданию БСЖО в нашем Институте.

Первые эксперименты по созданию устойчиво функционирующих БСЖО на основе жизнедеятельности как одноклеточных водорослей, так и высших растений, не увенчались успехом. Одноклеточные водоросли и высшие растения существовали в гермообъемах непродолжительное время, поэтому на первых этапах работ основные усилия исследователей были направлены на создание устойчиво функционирующих фотосинтетических звеньев БСЖО. Над решением задачи создания устойчиво функционирующего в искусственных условиях фотоавтотрофного звена работали специалисты различных институтов Академии наук СССР, а также отраслевых институтов.

Одновременно с работами по созданию технологий культивирования фотосинтетических звеньев велись работы по созданию стендовой базы для наземных экспериментов с моделями БСЖО. Наиболее солидные по оснащенности стендовые базы в 60-х годах прошлого века были созданы в ГНИИ авиационной и космической медицины (ГНИИАиКМ) МО СССР (ныне ГНИИ

авиационной медицины МО РФ), в Институте медико-биологических проблем (ИМБП) МЗ СССР (ныне ГНЦ РФ - ИМБП РАН) и в Институте биофизики (ИБФ) СО АН СССР (ныне ИБФ СО РАН). ИМБП и ИБФ стали основными разработчиками БСЖО в нашей стране.

Работы по созданию БСЖО в этих институтах в первые годы имели много общего. Однако к началу экспериментальных исследований с участием человека в конструкции стендовых баз и архитектуре построения отдельных систем появились принципиальные различия. В ГНИИАиКМ и ИМБП основным фотосинтетическим звеном БСЖО стали одноклеточные водоросли, а высшие растения в общем балансе регенерации атмосферы гермообъема составляли не более 50%. Основной функцией звена высших растений в этих моделях БСЖО являлось обеспечение овощной части рациона питания человека. В экспериментах, проводимых в ИБФ, высшие растения являлись основным средообразующим звеном системы: Если в ГНЦ РФ – ИМБП РАН, где в основном ориентировались на реальные условия космического полета, объем биологической системы в целом составлял 15 м³, то в ИБФ СО РАН - 300 м³.

В целом, в течение 60-х годов целенаправленно проводились работы по отработке методов и технологий культивирования с высокой степенью интенсивности растительных организмов в гермообъемах в условиях минимальных площадей и объемов, повышенных концентраций углекислоты и т.д. С этой целью в 1955 году чл.-корр. АН СССР **Анатолием Александровичем Ничипоровичем** в (1899 – 1995 гг.) в Институте физиологии растений им. К.А.Тимирязева АН СССР была создана лаборатория, которую возглавил чл.-корр. АН СССР **Виктор Ефимович Семенов** (1932 – 1998 гг.). Основной задачей лаборатории в первые десятилетия после ее создания была разработка принципов создания биологических систем жизнеобеспечения на основе фотосинтеза микроводорослей. Работы этой лаборатории в кооперации с ГНИИ авиационной и космической медицины (ГНИИАиКМ) МО СССР, а с 1963 года с Институтом медико-биологических проблем (ИМБП) МЗ СССР послужили основой для создания в ИМБП наземной модели БСЖО, где основным фотоавтотрофным звеном являлись одноклеточные водоросли.

Результатом этих работ явилось проведение (начиная с конца 60-х и кончая началом 80-х годов) серии экспериментов с различными моделями БСЖО, в которых испытатели жили и работали в гермообъемах, среда обитания которых создавалась растительными организмами, руководили этими работами **Евгений Яковлевич Шепелев** (1918 - 2002 гг.) и **Ганна Иосиповна Мелешко** (1924 - 1998 гг.).

Модель БСЖО «человек - одноклеточные водоросли – минерализация» была детально изучена в нескольких экспериментах и имеет самостоятельное практическое значение (рис. 1).

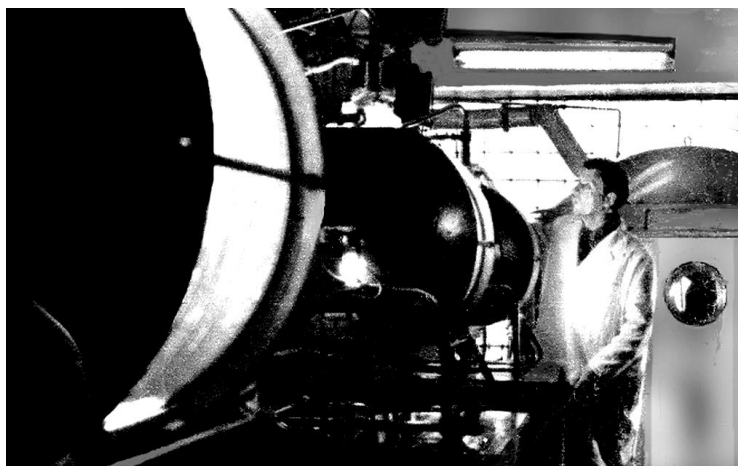


Рисунок 1 – Общий вид комплекса для проведения модельных экспериментов с участием испытателя по изучению БСЖО человека на основе одноклеточных водорослей.

Объем системы 5 м^3 , количество суспензии водорослей 45 л, плотность 10-12 г сухого вещества в 1 л, объем воды, включая суспензию водорослей, 59 л. Проведено 5 экспериментов длительностью до 1 месяца. Кроме человека и водорослей, в состав модели входили звено биологической минерализации мочи и устройства для обезвоживания биомассы водорослей, твердых отходов человека и испарения мочи с целью возврата содержащейся в них воды, а также аммиака, в общий круговорот. В систему извне поступали только минеральные соли для питания водорослей и сублимированные продукты пищевого рациона, к которому добавлялось до 50 г сухого вещества биомассы водорослей из расчета удовлетворения потребностей человека в растительном белке. Остальные необходимые человеку вещества регенерировались в системе, т.е. в системе осуществлялась регенерация атмосферы, воды и частично пищи (рис. 2).

Общим итогом работы этих моделей является полная регенерация атмосферы и воды, утилизация 95% углекислоты и воспроизводство до 10% ищи. В сумме это составляет до 90% регенерации потребляемых человеком веществ. Более сложные модели систем с включением высших растений исследовались в трех опытах длительностью от 1,5 до 2 месяцев. Посевная площадь растений составляла 15 м^2 , из них $11,25 \text{ м}^2$ занимала пшеница, остальную площадь - различные овощные растения (горох, свекла, морковь, капуста).

В результате включения в состав автотрофного звена высших растений были оптимизированы параметры системы и увеличена степень замкнутости круговорота веществ. Был достигнут полный баланс кислорода и углекислоты в атмосфере системы за счет приближения ассимиляционного коэффициента звена водоросли - высшие растения к

дыхательному коэффициенту человека. Степень регенерации пищи увеличилась по сравнению с предыдущей моделью системы до 26% от массы рациона.

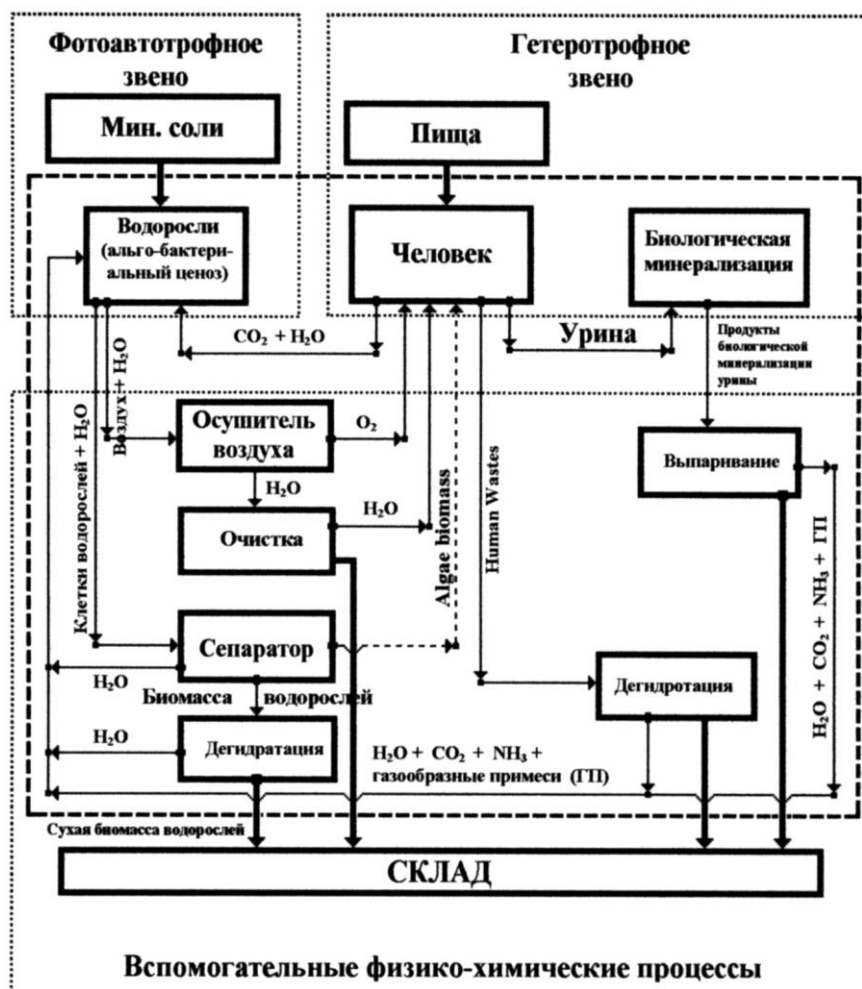


Рисунок 2 – Принципиальная схема модели БСЖО человека на основе одноклеточных водорослей

Увеличение замкнутости трофических связей при той же посевной площади может быть осуществлено путем оптимизации технологии выращивания растений, а также за счет извлечения и использования пищевых веществ из традиционно неупотребляемых человеком частей растений (листья, стебли). В составе моделей систем животные еще не изучались, хотя функциональное звено на их основе разрабатывалось с использованием традиционных животных (птиц) и нетрадиционных в пищевом отношении представителей беспозвоночных (безраковинные моллюски).

Отличительной особенностью биологической системы, разработанной в ИМБП являлся сравнительно малый объем - 15 м³. За месячный срок существования системы в ней осуществлялось 15 циклов полной регенерации кислорода, тогда как в биосфере Земли такой

цикл имеет длительность 3000 лет, т.е. длительность одного цикла кислорода в биологической системе жизнеобеспечения была на 5 порядков меньше, чем в биосфере Земли.

Проведенные в ИМБП эксперименты с моделями биологической системы, основанных на жизнедеятельности одноклеточных водорослей, высших растений и микроорганизмов, показали возможность регенерации до 90 - 92 % (в зависимости от структуры) потребляемых человеком веществ (кислорода, воды и частично пищи) при полной утилизации углекислоты. Кроме того, в системе осуществлялись:

- частичный круговорот азота за счет полного использования азота мочи человека одноклеточными водорослями;

- очистка атмосферы гермообъема от различных водорастворимых газообразных примесей за счет их полного поглощения и утилизации в фотореакторе водорослями и сопутствующими им микроорганизмами (фотореактор является универсальным самовосстанавливающимся гидробиологическим фильтром);

- оптимизация аэроионного и аэрозольного состава атмосферы (в атмосфере гермообъема преобладают отрицательно заряженные ионы);

- стабилизация содержания в атмосфере водонерастворимых газообразных примесей (метан, окись углерода и др.) за счет их адсорбции на поверхности клеток водорослей и микроорганизмов с последующим выводом из системы с выросшей биомассой;

- вытеснение из микробиоценоза гермообъема за счет конкурентных отношений всей микрофлоры, в том числе и патогенной для человека, которая не свойственна альгобактериальному ценозу, существующему в фотореакторе.

Таким образом, эксперименты с наземными моделями биологической системы жизнеобеспечения, проводившиеся в ИМБП, показали, что такие системы, несмотря на свою простую структуру, выполняют не только макрофункцию (регенерация атмосферы, воды и частично пищи), но и несут в себе ряд других функций, обеспечивая человеку адекватные его потребностям условия обитания. Следует отметить, что наличие в биологической системе жизнеобеспечения фотосинтетического звена, состоящего из одноклеточных водорослей, повышает надежность системы, что связано с высокой скоростью размножения одноклеточных водорослей и большим числом индивидуальных организмов-клеток (сотни миллионов клеток), размножающихся простым делением.

Однако, несмотря на высокую эффективность регенерации атмосферы и воды, выполнения ряда дополнительных функций по оптимизации среды обитания человека, данная система имеет один существенный недостаток. В системе практически отсутствует возможность возвращать в круговорот углерод и другие химические элементы, которые удаляются из системы с биомассой водорослей. В сутки необходимо синтезировать 450 г сухой

биомассы водорослей, чтобы полностью обеспечить газообмен человека. Включение в рацион питания человека 50 г биомассы водорослей является незначительной частью биомассы водорослей, которую необходимо получить для обеспечения выделения требуемого человеку кислорода и поглощения углекислоты из системы. Увеличить количество биомассы в рационе питания человека было невозможно. Исследования показали, что нативное потребление в пищу биомассы водорослей невозможно по целому ряду причин, в частности из-за неусвояемости человеком биомассы водорослей, а также аллергической реакции организма на ее потребление.

Модель БСЖО, созданная и испытанная в ИБФ СО АН СССР, как уже отмечалось выше, имела большие размеры и включала в свой состав экипаж, состоящий из 3-х человек. Исследования проводились в экспериментальном комплексе «БИОС-3» (рис. 3), разработанном группой специалистов ИБФ СО АН СССР под руководством **Бориса Григорьевича Коврова** (1932 - 1988 гг.) экспериментальными исследованиями руководили академики **Иван Александрович Терсков** (1918 - 1989 гг.) и **Иосиф Исаевич Гительзон**, разработчиком автотрофного звена на основе высших растений являлся **Генрих Михайлович Лисовский** (1929 - 2009 гг.).

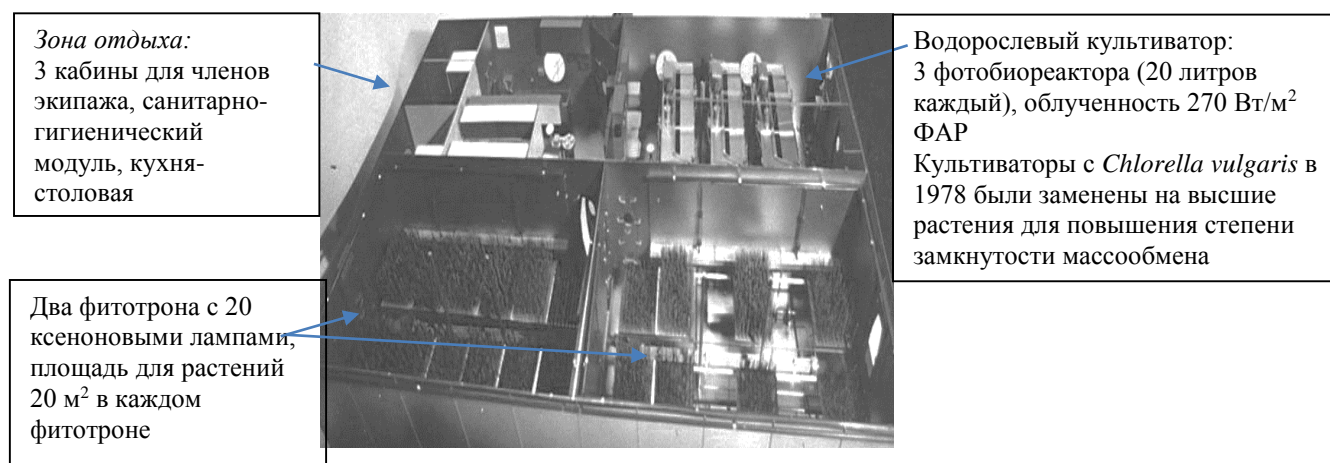


Рис. 3 – Макет комплекса «БИОС-3»

В комплексе «БИОС-3» в 70-х годах прошлого века был проведен самый длительный в нашей стране эксперимент с наземной моделью БСЖО. Эксперимент состоял из трех этапов, по два месяца каждый, и различающихся схемой массообмена, общая длительность эксперимента составила 180 суток (рис. 4, 5).

Однако в процессе проведения эксперимента специалисты столкнулись с рядом проблем, в частности наблюдалось негативное воздействие на рост и развитие растений. Одной из причин, по мнению постановщиков экспериментов было влияние на рост и развитие высших растений выделений одноклеточных водорослей, поэтому одноклеточные водоросли были

исключены из системы, а их место на этапе 3 эксперимента заняли фитотроны с высшими растениями, следует отметить, что для обеспечения регенерации атмосферы для одного человека требуется 20 м^2 посева высших растений. Однако, как оказалось, негативное влияние на высшие растения продолжалось. В итоге было принято решение введение в систему физико-химических методов очистки атмосферы. Это указывает на то, что высшие растения в качестве средообразующего звена в биологической системе являются уязвимыми для действия негативных фактов. Это, в свою очередь, при построении БСЖО, где высшие растения несут основную функцию по обеспечению газообмена человека, необходимо учитывать.



Рисунок 4 - Схема газо- и водообмена установки «Биос-3» на 1^М этапе эксперимента



Рисунок 5 - Схема газо- и водообмена установки «Биос-3» на 2^М этапе эксперимента

В целом наземная модель БСЖО человека, созданная в ИБФ, позволила провести полугодовой эксперимент с экипажем из трех человек и как в экспериментах, проведенных в ИМБП, был достигнут положительный результат.

В результате, более чем пятидесятилетней истории экспериментальной разработки систем жизнеобеспечения человека на основе биогенных механизмов в СССР и России, это направление исследований приобрело вполне определенную внутреннюю структуру и обоснованную последовательность. Разработка БСЖО опирается на теорию биоценологии, разработанную **Владимиров Николаевичем Сукачевым** (1880-1967 гг.), и однозначно вытекает из функциональной структуры земных биоценозов, в которых биологический круговорот веществ осуществляется в результате совокупной деятельности растений, животных и микроорганизмов. С этих позиций, БСЖО, осуществляющая относительно замкнутый круговорот веществ, должна включать в себя и соответствующие функциональные звенья - звено растений (фотоавтотрофных организмов), животных (человека) и микроорганизмов.

Создание каждого из звеньев системы (кроме человека) представляет собой самостоятельную проблему, поскольку интенсивное функционирование высокопродуктивных популяций или сообществ организмов в системе с частично замкнутым круговоротом веществ не может быть достигнуто с помощью существующих методов растениеводства, животноводства и промышленной микробиологии.

БСЖО человека предъявляет к фотоавтотрофному звену ряд требований, важнейшими из которых являются:

- высокая удельная продуктивность;
- устойчивость во времени основных функциональных характеристик в свойственных им пределах колебаний;
- совместимость с другими звеньями, которая не создавала бы дополнительной нагрузки на смежные звенья;
- минимум тупиковых веществ в материальном балансе звена.

Опираясь на проведенные исследования, можно констатировать, что как в системе, основанной на одноклеточных водорослях, так и в системе, основанной на высших растениях, удовлетворить всем этим требованиям не удастся. О тупиковых веществах в случае БСЖО на основе одноклеточных водорослей говорилось выше, однако и в случае с высшими растениями мы сталкиваемся с той же проблемой, пусть несколько в меньшем объеме.

Биосфера Земли имеет огромную буферность (твердая поверхность планеты, воздушный и водный океаны). В БСЖО нет никакой буферности, поэтому нужно с точностью до грамма рассчитывать входы и выходы как между звеньями системы, так и в целом материальный баланс системы. Кроме этого, в системе должны присутствовать дополнительные звенья как

биологические, так и физико-химические, с помощью которых ликвидируются тупики в материальном балансе системы. С этой целью наряду с работами по созданию фотоавтотрофного звена на протяжении всех лет велись и ведутся, в том числе и в настоящее время, работы по разработке методов биоутилизации биологических отходов системы для их возвращения в материальный баланс системы, максимальному использованию растительной биомассы в качестве продукта питания человека, а также по гетеротрофному звену, без которого обеспечить полноценное питание человека невозможно. Много лет работами по этому направлению исследований руководили **Владимир Иванович Фофанов, Сергей Иванович Цитович, Василий Васильевич Попов, Тамара Сергеевна Гурьева**, которая и в настоящее время продолжает работы с гетеротрофным звеном БСЖО как в наземных, так и в космических экспериментах

Создание БСЖО человека большая комплексная задача, в решении которой необходимо участие специалистов не только всех областей биологической науки, но и математиков, специалистов в области вычислительной техники, программистов, физиков, химиков, инженеров-конструкторов, представителей промышленности. В СССР проблемой создания БСЖО занимались различные институты Академии наук СССР и Союзных республик (Институт физиологии растений РАН, Институт биофизики СО РАН, Институт прикладной математики РАН, Институт молекулярной биологии и генетики Украинской академии наук (УАН), Институт ботаники им. М.Г.Холодного УАН и др.), университетские ученые (Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова, Киевский Государственный Университет им. Т.Г.Шевченко и др.), различные отраслевые институты и организации (ГНИИАиКМ МО СССР, ИМБП Министерства здравоохранения (МЗ) СССР, НИИХИММАШ, ВНИИ «Биотехника» Главмиробιοпрома, ЦСКБ «Биофизприбор», НПО «Энергия» и др.). Работы по этому направлению финансировались по линии АН СССР и по линии Министерства общего машиностроения. Головным учреждением по этой проблеме являлся ВНИИ «Биотехника», руководила работами Межведомственная комиссия при Военно-промышленной комиссии при ЦК КПСС и Совете министров СССР. В СССР ежегодно проводились Всесоюзные конференции по проблеме создания БСЖО. Без преувеличения можно сказать, что в 50 – 80-е годы прошлого столетия создание БСЖО человека являлась общегосударственной задачей. Наиболее интенсивно работы по созданию БСЖО проходили в 70-е годы прошлого столетия, именно в это время были проведены эксперименты с наземными моделями БСЖО в ИМБП и ИБФ. Однако в начале 80-х годов эксперименты с наземными моделями были прекращены. В это время Решением Межведомственной комиссии главному учреждению ВНИИ «Биотехника» было поручено разработать БСЖО человека для использования в космосе. Однако проект, предложенный ВНИИ «Биотехника», не был принят. В 1988 году в 3-ем

Главном управлении МЗ СССР прошло последнее заседание Межведомственной комиссии по созданию БСЖО человека.

В начале 90-х годов Межведомственная комиссия прекратила свою деятельность, но работы по проблематике БСЖО продолжались, хотя и с меньшей интенсивностью. В связи с отсутствием целевого финансирования большинство институтов и учреждений прекратило заниматься проблематикой БСЖО. В 90-е годы предпринимались попытки включить программу исследований БСЖО в перечень приоритетных научных исследований и получить соответствующее финансирование, но это так не было осуществлено, последняя попытка была предпринята в 2012 году, также безуспешно. Фактически только ГНЦ РФ – ИМБП РАН и ИБФ СО РАН последние годы продолжают исследования в области создания БСЖО, хотя это больше исследования некоторых компонентов и технологий БСЖО, в том числе в условиях космического полета, а не комплексные исследования, охватывающие весь спектр задач.

Проблеме создания БСЖО в конце 50-х начале 60-х годов было уделено внимание не только в нашей стране, но и в США. Однако уже в 1966 году все работы в этом направлении в США были прекращены. Новый интерес к проблеме создания появился в начале 80-х годов прошлого века, когда в США были начаты работы по программе CELSS (Controlled Ecological Life Support System). В Космическом центре им. Дж.Кеннеди (КЦК) НАСА были начаты работы по созданию звена высших растений для БСЖО. На основе разработанных технологий культивирования высших растений в гермозамкнутых объемах на базе Космического центра им. Л.Джонсона НАСА (КЦД) в 90-х годах прошлого века были проведены экспериментальные исследования с участием человека. В отличие от экспериментов, проводившихся в нашей стране, человек и растения во время эксперимента находились в изолированных друг от друга объемах, а газообмен между ними осуществлялся за счет применения специальных средств. В качестве фотоавтотрофного звена в этих экспериментах была использована пшеница, длительность экспериментов с участием человека не превышала 15 суток. В настоящее время исследования БСЖО в КЦК и КЦД НАСА приостановлены, хотя и продолжаются исследования звена высших растений. В настоящее время основные усилия американских специалистов направлены на создание нового поколения СЖО на основе физико-химических процессов, а также разработке оранжерейных устройств для использования на борту космических аппаратов.

В Канаде в Университете Гвэлф создан комплекс для исследований возможности культивирования высших растений в условиях пониженного давления. Комплекс имеет 10 герметичных камер, в которых культивируют при пониженном давлении различные растения, возможные компоненты будущих СЖО. Исследования, проводимые в университете Гвэлф, связаны с необходимостью изучить возможность культивирования высших растений

применительно к космическим аппаратам США, в которых предполагается иметь пониженное по сравнению с земным давление внутри аппарата.

В начале 80-х годов над проблемой создания БСЖО начали работать в Японии. С этой целью в Японии был построен экспериментальный комплекс Closed Ecological Experimental Facility (CEEF), предназначенный для создания замкнутого цикла трансформации веществ на основе сочетания передовых физико-химических и биологических технологий. Комплекс имеет максимально развитую на сегодняшний день систему контроля и обработки информации о характере и интенсивности процессов и позволяет активно управлять этими процессами снаружи и изнутри. В 2004 году в этом комплексе планировалось начать 2-х летний эксперимент с участием человека, однако на сегодняшний день проведен 2-х недельный эксперимент с участием 4-х испытуемых, поочередно находившихся внутри системы. В перспективных планах проведение длительных экспериментов с участием человека пока не планируется. В настоящее время комплекс используется в большей степени в интересах агробиологической науки.

Следует отметить, что работы, проводимые в Канаде и Японии, имеют тесную кооперацию с НАСА и осуществляются в рамках космических программ США.

Активные работы по созданию систем жизнеобеспечения на основе биологического круговорота веществ ведутся в рамках программы MELISSA Европейского космического агентства (ЕКА). На данном этапе основными направлениями исследований в рамках программы MELISSA являются микробиологические исследования и исследования автотрофного звена на основе высших растений. Для реализации этих исследований в Испании построены специальные комплексы, оснащенные необходимым оборудованием как для культивирования организмов в условиях гермообъема, так и для их детального исследования.

В начале 90-х годов прошлого века работы по созданию БСЖО начались в Китайской народной республике. Китайские исследователи опирались на опыт российских ученых из ИБФ СО РАН. В результате к настоящему времени в КНР созданы, по крайней мере, две стендовые базы для проведения наземных исследований с моделями БСЖО. Основная стендовая база создана в Центре подготовки тайконавтов (бывший Institute Space Medicine Engineering), вторая стендовая база создана в Пекинском университете. В 2014 году в Пекинском университете проведен 105-ти суточный эксперимент с тремя испытуемыми с моделью БСЖО с фотоавтотрофным звеном на основе высших растений.

В начале 80-х годов прошлого века на волне страхов о ядерной зиме группа энтузиастов решила построить миниатюрную копию биосферы Земли, чтобы в случае вселенской трагедии была возможность кому-то выжить. Так возник проект «Биосфера-2». Суть проекта заключалась не в построении БСЖО, а в миниатюрном воспроизводстве биосферы Земли.

Основная идея заключалась в попытке в небольшом объеме разместить наиболее типичные для биосферы биогеоценозы. Инициаторы проекта приезжали в СССР, где рассказывали о своих идеях. При обсуждении советские ученые, не отвергая саму идею реализации такого проекта, указывали на проблемы, с которыми столкнутся авторы идеи. Это, прежде всего, несбалансированность материальных потоков внутри всей системы и, как следствие, нехватка тех или иных ресурсов для обеспечения жизнедеятельности тех, кто будет находиться внутри. В 1988 году после окончания строительства и формирования биогеоценозов внутри объема в 300 тысяч м³, был начат двухгодичный эксперимент. Внутри комплекса «Биосфера-2» 8 испытателей должны были прожить в течение 2-х лет. Однако предостережения советских ученых полностью оправдались во время проведения этого эксперимента. «Биосфера-2» оказалась неспособна обеспечить жизнедеятельность 8-ми испытателей. В системе снижалась концентрация кислорода, людям не хватало питания. В итоге извне в систему передавали пищу, закачивали кислород. Однако этот эксперимент дал важный результат, который показывает, что создание БСЖО требует точных расчетов материальных потоков в системе, а также необходимость наличия резервов, способных восполнить возникший разбаланс в системе.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что создание СЖО на основе биологического круговорота веществ является приоритетной задачей для всех участников пилотируемых космических программ, без решения которой длительный выход человека за пределы земной биосферы невозможен. Однако, как показывает опыт исследований по созданию БСЖО, проведенных в СССР, создание только наземных моделей БСЖО недостаточно для их внедрения на борт космических аппаратов и в состав СЖО будущих планетарных баз. Проблема связана с тем, что невозможно создать универсальную модель БСЖО, способную устойчиво функционировать в различных условиях. БСЖО – система, структура которой зависит как от энерго-массо-габаритных ограничений объекта, где она должна функционировать, так и от количества членов экипажа данного объекта, т.к. человек является неотъемлемой частью системы. Таким образом, для каждого конкретного объекта архитектура и состав БСЖО или ее элементов, встроенных в состав физико-химических СЖО, будет уникальным. Кроме этого, как и в первые годы работ по созданию БСЖО, на первый план выходят работы по исследованию биологических объектов, возможных компонентов БСЖО, но уже применительно к условиям реального космического полета (невесомость, хроническое облучение малыми дозами радиации различного спектра, гипомагнетизм и т.д.), а также по разработке технологий их культивирования на борту космических аппаратов и будущих планетарных базах.

В начале 80-х годов в нашей стране эксперименты с наземными моделями БСЖО, включающих человека, были прекращены, и основные усилия были направлены на отработку

отдельных узлов БСЖО, их сопряжению между собой и с физико-химическими процессами регенерации среды обитания. Одним из основных направлений научно-исследовательских работ стало исследование влияния условий космического полета на биологические объекты - звенья БСЖО, и создание технологий их культивирования на борту орбитальных станций. В состав наземных модельных БСЖО входят различные организмы, начиная с бактерий и кончая человеком, поэтому для реализации космических БСЖО необходимо проведение полетных исследований с биологическими объектами разных уровней биологической организации.

Многочисленные биологические исследования, которые проводились на борту различных космических аппаратов, не давали ответа на главные вопросы, без решения которых говорить о возможности создания СЖО космических экипажей на основе биологического круговорота веществ нельзя. В связи с этим, начиная с конца 70-х годов прошлого века, на борту различных орбитальных станций проводятся эксперименты с организмами, возможными компонентами будущих СЖО межпланетных космических кораблей и планетарных баз. Эти исследования направлены на получение достоверной информации о функционировании организмов (звеньев) БСЖО в условиях невесомости, что является первым, но очень важным, шагом на длительном пути внедрения биологических процессов в СЖО космических экипажей. Реализация этой задачи требует проведения широкого спектра исследований с целью:

- определения биологической роли факторов космического полета и, прежде всего, невесомости, как в жизни самих организмов (индивидуумов), так и в жизни сообществ (популяций и биоценозов);
- создания технологий культивирования высокопродуктивных популяций автотрофных и гетеротрофных организмов в условиях космического полета;
- создания технических средств, способных обеспечить нормальную жизнедеятельность автотрофных и гетеротрофных организмов, звеньев БСЖО, в условиях космического полета.

Фотоавтотрофное звено как на основе низших растений, так и на основе высших растений, обеспечивает энергетическую основу существования БСЖО и определяет облик и функциональные возможности системы. Поэтому исследования влияния невесомости на функциональные характеристики фотоавтотрофных организмов имеют первоочередное значение в проблеме продвижения БСЖО на борт космических летательных аппаратов.

Одноклеточные водоросли были одними из первых организмов, на которых изучали влияние условий космического полета на биологические объекты, возможные компоненты БСЖО. В экспериментах по экспонированию одноклеточных водорослей на борту различных космических аппаратов, не было получено однозначного ответа о влиянии невесомости на скорость роста, развитие и продуктивность водорослей, что является главным при оценке перспектив использования одноклеточных водорослей в качестве автотрофного звена БСЖО. С

учетом всего этого на борту орбитальной станции (ОС) «Салют-6» были проведены эксперименты «Хлорелла», целью которых являлось изучение влияния факторов космического полета (ФКП) и, в первую очередь невесомости, на основные фундаментальные биологические процессы активно растущих культур водорослей. Эксперименты «Хлорелла» с гетеротрофной культурой одноклеточных водорослей проводились совместно с чешскими и украинскими учеными в рамках программы «Интеркосмос», для культивирования водорослей на борту ОС использовали прибор ИФС-2.

В результате исследований, проведенных на борту ОС «Салют-6», впервые было показано отсутствие первичного биологического действия невесомости на все исследованные параметры активно растущей культуры одноклеточных водорослей как на организменном, так и на уровне взаимоотношений в системе «организм-среда». Установлено, что невесомость никак не влияет на развитие популяции водорослей в случае, если при постановке наземных контролей учтены все физические особенности среды обитания водорослей в невесомости (изменение площади раздела фаз внутри прибора ИФС-2).

Исследовать автотрофную культуру одноклеточных водорослей удалось при проведении экспериментов с модельной микроэкосистемой на борту биоспутников и на борту орбитального комплекса (ОК) «Мир». В этих экспериментах впервые было показано, что невесомость не оказала влияния на функционирование микроэкосистемы «водоросли – бактерии – рыбы». Все изменения, которые происходили в системе за время ее существования в условиях гравитации и в условиях невесомости, были одинаковы, а рост, развитие и размножение популяции одноклеточных водорослей в составе системы проходили также как и на Земле. Эти результаты дают основание говорить, что условия на борту космического аппарата не будут препятствием для использования одноклеточных водорослей в качестве автотрофного звена в системе СЖО, при условии наличия необходимых технологий для их культивирования.

Исследование роста и развития высших растений при воздействии ФКП остается одним из важнейших вопросов космической биологии. Важность таких исследований совершенно очевидна, так как они позволяют оценить степень зависимости основных жизненных процессов растений от эволюционно значимого фактора - гравитации, а эти результаты являются научной базой для проектирования будущих космических оранжерей и биологических систем жизнеобеспечения экипажей межпланетных космических экспедиций и напланетных баз.

В России на протяжении многих лет ведутся эксперименты с высшими растениями на борту различных космических аппаратов. На первом этапе космические эксперименты (КЭ) проводились с использованием различных простых оранжерейных устройств (Оазис, Оазис-М, Фитон, Светоблок). В этих КЭ делалась попытка исследовать фундаментальные вопросы космической биологии растений, а также решить биотехнические задачи по отработке режимов

и технических средств для культивирования растений в условиях невесомости. Однако эти оранжерейные устройства в большинстве своем имели ограниченные возможности как в способности обеспечить оптимальные условия при выращивании растений в условиях невесомости, так и в возможности получения информации в процессе проведения КЭ. В целом эти эксперименты дали отрицательный результат в том смысле, что рост и развитие высших растений в условиях невесомости проходили с существенными отклонениями от таковых в условиях земной гравитации. Это дало возможность говорить о том, что невесомость является существенным препятствием на пути нормального развития растений.

Второй этап космических исследований, началом которого можно считать 1980 год, ознаменовался, прежде всего, разработкой более совершенных экспериментальных космических оранжерейных устройств. Так, по программе «Интеркосмос» была создана российско-болгарская оранжерея «Свет», при разработке которой был учтен опыт эксплуатации предыдущих оранжерейных устройств и результаты КЭ первого этапа исследований.

Одним из важнейших элементов оранжерейных устройств, используемых в условиях невесомости, является корневой модуль. Проведенные эксперименты показали, что обеспечение оптимального газо-жидкостного распределения в корнеобитаемой среде в условиях невесомости, задача значительно более сложная, чем это представлялось на первых этапах исследований. Свидетельством этого являются результаты первого эксперимента в оранжерее «Свет» длительностью 54 дня, который был проведен на борту ОК «Мир» в 1990 г. Этот эксперимент дал противоречивые результаты. С одной стороны, было показано, что морфогенез растений салата и редиса в условиях невесомости проходит нормально, а с другой стороны, растения в невесомости значительно отставали в темпах развития и значительно уступали в размерах растениям из наземного контроля. Мнения о причинах этих явлений были различны, в том числе предполагалось, что изменения вызваны неоптимальными условиями водообеспечения и минерального питания.

В 1993 г. были начаты работы по подготовке совместных российско-американских экспериментов с высшими растениями в рамках научной программы «Мир-НАСА». Одной из важных составляющих в этих работах было создание под руководством **Гейла Елдона Бингхема**, сотрудника Лаборатории космической динамики Университета штата Юта (ЛКД-УШЮ) комплекса оборудования «Измерительная система оранжереи «Свет» (Gas Environment Measurement System - GEMS). Данная система предназначалась для мониторинга параметров окружающей среды во время проведения КЭ с высшими растениями на борту ОК «Мир», а главным исследованием водораспределения в корнеобитаемой среде с помощью датчиков, разработанных сотрудником ИМБП **Игорь Григорьевичем Подольским**.

Первым экспериментом, в котором была использована система GEMS, был эксперимент «Оранжерея-1» с пшеницей суперкарлик. В этом эксперименте удалось впервые увидеть реальную картину распределения влаги в корнеобитаемой среде в условиях невесомости. Из показаний датчиков влажности субстрата стало очевидно, что после подачи воды влага поступает в сухой субстрат через 12 часов (зоны, расположенные вблизи места поступления воды) и через 36 часов (зоны, находящиеся на периферии). Анализ полученных данных позволил разработать технологию полива растений в невесомости.

В течение многих лет специалисты разных стран неоднократно предпринимали попытки исследовать полный цикл вегетации растений в условиях невесомости. Первым космическим экспериментом, в котором удалось исследовать процессы роста и развития пшеницы на протяжении всего цикла онтогенеза, стал эксперимент «Оранжерея-2», проводившийся в рамках научной программы «Мир-НАСА» на борту ОК «Мир» в 1996-1997 гг. под руководством **Маргариты Александровны Левинских**. Объектом исследований являлась пшеница суперкарлик. В этом эксперименте было показано, что длительность полного цикла вегетации пшеницы суперкарлик и его отдельных стадий в полетном эксперименте была такой же, как и в многочисленных наземных контрольных экспериментах. Эти результаты были подтверждены в дальнейшем в экспериментах с пшеницей Апогей-УШЮ («Оранжерея-4», «Оранжерея-5») на борту ОК «Мир» и в экспериментах «Растения-2/Лада-2-17» на борту МКС.

Анализ растений, полученных в эксперименте «Оранжерея-2» показал, что во всех 280 колосьях, сформировавшихся в условиях невесомости, отсутствуют зерновки. Космические растения отличались морфометрически, все это очень напоминало то, с чем сталкивались ученые при проведении экспериментов в комплексе БИОС-3 в Красноярске. Исследования показали, что отсутствие зерновок в колосьях пшеницы в полетном эксперименте объяснялось полной мужской стерильностью, что было связано с повышенной концентрацией этилена в атмосфере орбитального комплекса.

Известно, что этилен является одним из важнейших регуляторов роста и развития растений и в низких концентрациях ($0,04-1,0 \text{ мг/м}^3$) обладает сильным морфогенетическим действием на растения. Концентрация этилена в атмосфере ОК «Мир» впервые была измерена лишь после проведения полетного эксперимента «Оранжерея-2» и составила от 0,3 до $1,8 \text{ мг/м}^3$. Это позволило предположить, что одним из наиболее действенных факторов, влияющих на рост и развитие растений при культивировании в оранжерее «Свет», являлась повышенная концентрация этилена в воздушной среде ОК «Мир».

Для проверки выдвинутого предположения были проведены послеполетные исследования роста и развития пшеницы суперкарлик в течение полного цикла вегетации при повышенном содержании этилена в газовой среде в условиях гермокамеры. Как и в полетных условиях,

воздействие повышенного содержания этилена привело к увеличению числа побегов кущения, полной пустозерности колосьев и укорочению соломины при неизменившейся массе растения. С учетом накопленного опыта специалистами ИМБП и ЛКД УШЮ в рамках российской научной программы был подготовлен и проведен КЭ «Оранжерея-4» по исследованию роста, развития и репродукции пшеницы сорта Апогей-УШЮ при выращивании в оранжерее «Свет» на борту ОК «Мир». Основным результатом эксперимента явилось получение 508 семян от 12 растений пшеницы. Результаты данного эксперимента доказали возможность получения зернового урожая пшеницы в условиях космического полета, подтвердив ранее сделанный вывод о том, что невесомость не оказывает непосредственного влияния на элементарные генетически детерминированные биологические процессы, в том числе рост, развитие и размножение растений.

В эксперименте «Оранжерея-2» впервые было проведено измерение интенсивности фотосинтеза и транспирации посева пшеницы. Для этой цели использовалась система GEMS, с помощью которой измеряли концентрации кислорода, CO₂ и водяных паров, а также атмосферное давление, уровень освещения, температуру воздуха, температуру листа, температуру в корневой зоне и влажность субстрата. Кроме того, эта система была способна измерять интенсивность газообмена посева растений.

Измерения, проведенные в КЭ «Оранжерея-2», показали, что интенсивность фотосинтеза посева составила 10-13 $\mu\text{моль}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ CO₂. Этот результат совпадает с данными по интенсивности фотосинтеза, полученными в серии наземных экспериментов. Уровень транспирации посева был достаточно высоким (45% от поданного в корневой модуль объема воды) и мало различался в темновой и световой периоды, что предполагает наличие устьичной проводимости у растений в условиях космического полета, сопоставимой с проводимостью у растений, выращиваемых в условиях гидропоники.

В эксперименте «Оранжерея-2» было проведено исследование состава фотосинтетически активных пигментов у растений суперкарликовой пшеницы, которая выращивалась в течение 42 суток в оранжерее «Свет» на борту ОК «Мир». Зеленые растения сразу после съема были заморожены в жидком азоте и в замороженном виде доставлены на Землю. Через 3 часа после посадки космического корабля «Спейс Шаттл» из части листьев без предварительного размораживания экстрагировали хлорофиллы а и б и каротиноиды. В полетном эксперименте обнаружено снижение содержания пигментов в листьях на 18-25 %, но не выявлено изменений в соотношении между основными фотосинтетическими пигментами.

При проведении эксперимента «Оранжерея-3» на борту ОК «Мир» по выращиванию короткоциклической *Brassica rapa L.* были выполнены исследования пигментного состава листьев растений. Общее содержание пигментов в растениях немного уменьшалось по

сравнению с растениями из предварительного наземного эксперимента (без добавления этилена), причем это снижение происходило за счет хлорофиллов. Соотношение хлорофиллов a/b при этом не нарушалось. При проведении послеполетного эксперимента, в котором растения выращивались при соблюдении полетных параметров окружающей среды, включая и повышенную концентрацию этилена, было показано, что содержание хлорофиллов в биомассе было практически таким же, как и в полетном варианте.

В экспериментах «Оранжевая-2» и «Оранжевая-3» на борту ОК «Мир» были проведены исследования углеводного состава растений суперкарликовой пшеницы и короткоциклической *Brassica rapa L.* В конце вегетации не обнаружено существенных различий в количественном и качественном составе углеводов в листьях растений пшеницы в полетном и контрольном экспериментах. В то же время в стеблях растений полетного эксперимента содержание свободных сахаров составляло 60 % от такового в стеблях растений контрольного эксперимента, что, по-видимому, было связано с более высоким содержанием полисахаридов в стеблях полетных растений.

Таким образом, анализ результатов экспериментов серии «Оранжевая», проведенных в рамках научной программы «Мир-НАСА» на борту ОК «Мир» показал, что фотосинтетический процесс в целом и такие его составляющие, как газообмен, метаболизм фотосинтетических пигментов и углеводов, рост и размножение растений не зависят от условий невесомости в случае использования адекватных технологий выращивания растений.

Интерес к исследованиям роста и размножения растений под воздействием факторов космического полета возник с началом космической эры и диктовался не только стремлением понять, влияет ли столь непривычная для земных организмов среда на их основные функции, но и практическими задачами создания будущих оранжевых для жизнеобеспечения человека в длительных космических полетах.

В рамках программы «Мир-НАСА» и российской научной программы были проведены исследования роста и развития растений в ряду поколений при проведении экспериментов по культивированию короткоциклической *Brassica rapa L.* и пшеницы сорта Апогей-УШЮ в оранжевой «Свет» на борту ОК «Мир». В этих экспериментах, проведенных в период 1997-1999 гг., получены первые положительные результаты исследований роста и развития растений в ряду поколений. Исследования семян, полученных у космических растений, не выявили у них каких-либо отличий по сравнению с семенами, полученными от земных растений. Растения, выращенные из космических и земных семян, также не различались.

Следующим этапом полетных исследований с растениями должно было стать изучение процессов микроэволюции и отдаленных генетических последствий длительного культивирования растений в космосе. Такие исследования были выполнены на борту

Российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС) с использованием нового поколения оранжерейного устройства.

В марте 2003 г. на борту РС МКС начата серия экспериментов по исследованию влияния ФКП на генетически маркированные линии гороха в ряду последовательных поколений с использованием оранжереи «Лада», созданной совместно специалистами ИМБП (**Игорь Григорьевич Подольский, Олег Михайлович Стругов**) и ЛКД УШЮ (**Гейл Елдон Бингхем**).

На этапах 7, 8, 9 и 10-ой основных экспедиций на борту РС МКС были проведены эксперименты по выращиванию растений гороха линия 131 (усатый с красными цветами) в ряду последовательных поколений. В период с мая по август 2003 г. были получены семена первого «космического» поколения гороха. После созревания бобов растения были срезаны и оставлены на хранение на борту до начала следующего эксперимента. В период с января по апрель 2004 г. был проведен эксперимент со вторым «космическим» поколением растений гороха. Растения прошли полный цикл онтогенетического развития и сформировали полноценные семена, которые после созревания были оставлены на хранения на борту. В период с августа по октябрь 2004 г. на борту РС МКС был проведен эксперимент с третьим «космическим» поколением гороха. В результате эксперимента были получены семена третьего «космического» поколения гороха, которые были посажены в оранжерею «ЛАДА» в январе 2005 г. с целью получения в условиях космического полета четвертого «космического» поколения растений, а в апреле 2005 года на борту РС МКС был получен урожай семян четвертого «космического» поколения гороха.

Морфометрический анализ растений показал, что растения 4-го «космического» поколения не отличались от растений 1-го «космического» поколения по своим основным характеристикам, однако семенная продуктивность у них была несколько больше.

Цитологический анализ аббераций хромосом в клетках первичных корешков, развившихся из семян, полученных на борту РС МКС, показал, что статистически достоверного повышения числа перестроек хромосом у экспериментальных растений по сравнению с контрольными растениями обнаружить не удалось. Более того, если в первом «космическом» поколении было обнаружено незначительное увеличение процента аббераций хромосом по сравнению с контролем, то в последующих «космических» поколениях абберации хромосом в первичных корешках вообще не обнаруживались.

Сравнение спектров, полученных у растений во всех 4-х «космических» поколениях и у контрольных растений, по маркерам, мономорфным в контроле, не выявило видимых отличий. Анализ спектров экспериментальных растений показал, что в каждом таком растении амплифицируются все ожидаемые фрагменты, при этом новых фрагментов не наблюдается.

Таким образом, не обнаружено отличий по ДНК-маркерам у 4-х последовательных «космических» поколений растений как между собой, так и в сравнении с контрольными растениями.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что впервые в мире в условиях космического полета на борту РС МКС получено четыре последовательных поколения семян генетически маркированной линии гороха. Показано, что характеристики роста и развития растений гороха различных линий при выращивании в течение полного цикла онтогенеза в космической оранжерее «Лада» существенным образом не изменяются по сравнению с наземным контрольным вариантом. Впервые в мире с использованием молекулярного метода RAPD – праймеров (Random Amplified Polymorphic DNA) по 10 маркерам и анализа хромосомных аббераций показано, что у растений, прошедших четыре полных цикла развития в условиях космического полета, не выявлен генетический полиморфизм, что позволяет говорить об отсутствии влияния ФКП на генетический аппарат растений в первом - четвертом «космическом» поколениях. Анализ результатов по выращиванию четырех последовательных генераций гороха линии 131 позволяет говорить о том, что растения могут длительное время, сопоставимое с длительностью, например марсианской экспедиции, выращиваться в условиях космического полета без потери репродуктивных функций и формировать при этом жизнеспособные семена.

Условия космического полета являются неестественными для растений. Множество факторов как собственно космического полета (невесомость, повышенный уровень радиации различного спектра, измененное электромагнитное поле), так и свойственных замкнутому гермообъему (температура, влажность, загрязненность атмосферы), могут негативно влиять на живые организмы. Эксперименты, проведенные на борту ОК «Мир» и РС МКС показали, что растительные организмы способны нормально расти, развиваться и размножаться в этих условиях, в случае, если они получают все необходимое для их существования. Однако отсутствие фенотипических изменений и, даже отсутствие полиморфизма у растений при выращивании в ряду поколений, не дает основание говорить о том, что растительные организмы не испытывают стресса в условиях космического полета.

На этапе 13-й основной экспедиции на МКС был проведен эксперимент по выращиванию ячменя *H. vulgare* сорта *Haruno Nijo*. Семена ячменя, размещенные в полиэтиленовом пакете, были доставлены на РС МКС на борту грузового корабля «Прогресс-М56» 24 апреля 2006 года, а 31 августа 2006 года семена ячменя были посажены в корневой модуль оранжереи «Лада». Семена ячменя сорта *Haruno Nijo*, хранившиеся на борту РС МКС более четырех месяцев, проросли через 3 дня после посадки и начала увлажнения корнеобитаемой среды. Степень прорастания составила более 90%. Высота побегов проросших растений достигала 50-60 см,

кроющий лист открылся на 26 день культивирования. Рост и развитие растений, которые высаживали в качестве контроля на Земле, были идентичны.

Через 26 дней культивирования проростки были срезаны и спущены на Землю. Через сутки после срезки растения были доставлены в лабораторию ГНЦ РФ - ИМБП РАН и помещены в раствор RNeasy RNA stabilization reagent (Qiagen, USA), предотвращающий деградацию мРНК в образцах. Были проведены работы по выделению и очистке общей РНК из листьев ячменя. Для понимания молекулярных процессов, лежащих в основе ответа организмов на влияние факторов космического полета, был проведен анализ экспрессии целого генома методом ДНК-микрочипов. Впервые было показано увеличение транскрипции генов белков, участвующих в элиминации активных форм кислорода (АФК) из клеток растений в условиях реального космического полета. Увеличения транскрипции генов других стресс-белков у полетных растений не обнаружено. Это может служить косвенным доказательством наличия факторов, вызывающих окислительный стресс у растений на борту РС МКС. Вопрос о природе этого компонента космического полета остается открытым. Наиболее вероятными причинами могут являться космическая радиация и невесомость. Также следует помнить, что космическая станция является закрытой системой с постоянно меняющимся газовым составом среды, четко коррелирующим с частотой доставки грузов и оборудования на МКС транспортными и грузовыми кораблями. Состав атмосферы МКС в период проведения эксперимента «Растения-2/Лада-9» характеризовался повышенным содержанием поллютантов, что также могло явиться причиной увеличения транскрипции генов белков, участвующих в элиминации АФК из клеток растений. В дальнейшем содержание поллютантов в атмосфере станции сократилось благодаря проведенным мероприятиям по очистке атмосферы, что подтвердили результаты эксперимента «Растения-2/Лада-15», в котором выращивали пшеницу суперкалик. В отличие от эксперимента «Оранжевая-2» на борту ОК «Мир» на борту МКС пшеница суперкалик дала семена.

Эксперименты с высшими растениями, проведенные на борту ОК «Мир» и на борту РС МКС, дают основание говорить о возможности культивирования высших растений в условиях космического полета. Однако для включения оранжевой с высшими растениями в состав СЖО космических экипажей с целью получения растительной части рациона питания человека необходимы дополнительные исследования. Это, прежде всего, микробиологические исследования. В условиях космического гермообъема высока вероятность резистентного заселения микрофлорой участков с повышенной влажностью, каковыми являются оранжевые устройства с находящимися в них растениями.

Анализ микробиологических проб, который проводился под руководством **Натальи Дмитриевны Новиковой**, отобранных с листьев растений, с внутренней стенки оранжевой «Лада» и из воздуха в районе расположения оранжевой в период с января 2005 года по сентябрь

2008 года во время 10-14, 16 и 17 основных экспедиций на Международной космической станции показал, что:

- уровни микробной обсемененности исследованных проб в тех случаях, когда были обнаружены грибы, характеризовались низкими величинами, не превышающими нормативные показатели.

- видовой состав обнаруженных микроорганизмов был представлен непатогенными видами, обитателями природных резервуаров, часто встречающимися в среде обитания МКС.

Таким образом, проведенные микробиологические исследования показали, что обсемененность растений, выращиваемых на борту РС МКС, незначительна. Обнаруженные на листьях микроорганизмы в основном являются представителями аутомикрофлоры человека или типичными представителями среды обитания гермообъема МКС. Все выявленные микроорганизмы не являются патогенными для человека, поэтому можно констатировать, что отсутствуют серьезные микробиологические риски при употреблении в пищу растений, выращенных на борту космической станции.

Анализ результатов экспериментов с высшими растениями на борту ОК «Мир» и на борту РС МКС показывает, что растения способны расти, развиваться и размножаться в условиях орбитального полета. Растения формируют нормальный посев, сопоставимый с таковым в наземных условиях. Обсемененность растений микрофлорой находится в пределах нормы, патогенные микроорганизмы на растениях не обнаружены. Не обнаружены и генетические изменения у растений, по крайней мере, в четырех «космических» поколениях. Все вышесказанное даёт основание говорить о возможности включения высших растений в состав СЖО межпланетных космических миссий.

При длительных космических полетах человека в ближайшие 15-20 лет обеспечить существование экипажа можно будет лишь, используя те же основные устройства и процессы, которые функционируют на борту РС МКС. В большинстве своем они были разработаны и внедрены в практику пилотируемой космонавтики в последней трети прошлого века и начале этого века. Их длительная эксплуатация на борту ОК «Мир» и на борту РС МКС, показала высокую степень надежности этих систем, позволила изучить их эксплуатационные характеристики в условиях реального космического полета. Однако функционирование СЖО современной орбитальной станции связано с постоянным восполнением необходимых ресурсов, а также удалением из системы больших объемов различных веществ таких, как отходы жизнедеятельности экипажа и отходы функционирования самой системы жизнеобеспечения. Поэтому, такая СЖО не сможет полностью удовлетворить все потребности человека в условиях отсутствия связей с биосферой Земли.

Включение биологических подсистем (по крайней мере, оранжереи) в состав СЖО межпланетных миссий позволит сформировать среду обитания в корабле, в той или иной мере, адекватную долговременным биологическим потребностям человека, и будет способствовать устранению некоторых возможных последствий длительного пребывания человека в искусственной (абиогенной) среде обитания. Включение оранжерейного устройства в состав существующих СЖО космических аппаратов потребует внесения ряда изменений в их функциональную схему и, в частности, приведет к перераспределению материальных потоков внутри СЖО. Не рассматривая детально материальные потоки всей СЖО отметим, что материальные потоки, которые будут связаны с функционированием оранжерейного устройства, должны учитывать функциональные возможности СЖО долговременных космических миссий.

По мнению многих специалистов, работавших в проблематике БСЖО, производственная оранжерея в составе СЖО, скорее всего, будет предназначена для выращивания овощных культур, в основном салатных и пряно-вкусовых. Согласно диетологическим исследованиям, суточная норма потребления салатных культур для одного человека составляет в среднем около 100 г сырой биомассы. Для обеспечения суточной нормы салатных культур в рационе питания экипажа межпланетной экспедиции, который предположительно может состоять из 6 человек, необходимо вырастить до 600 г сырой биомассы. Средняя продуктивность зеленных культур в наземных экспериментах по отработке культивирования в макетах космических оранжерейных установок при сопоставимых условиях составляет в среднем около 100 г сырой биомассы/м²-сутки. При этом следует учитывать, что продуктивность посева растений в оранжерее в значительной степени зависит от затрат электроэнергии, типа источников освещения, конструкции блоков освещения и вегетационного сосуда, количества и качества корнеобитаемой среды, наличия микропримесей в газовой фазе, от видовой и сортовой принадлежности выращиваемых растений и пр. Исходя из этого, предварительные расчеты показывают, что для обеспечения необходимого производства сырой биомассы салатных культур необходимо иметь около 10 м² посевной площади. На современных пилотируемых аппаратах оборудование и приборы располагаются в локерах унифицированных стоек, укрепленных вдоль стен космических модулей. Оранжерея с посевной площадью 10 м² может быть размещена в 5-ти стандартных стойках, например таких, как использовались на космическом корабле «Спейс Шаттл». Общий объем оранжерейного устройства (правильнее сказать, оранжерейных устройств, так как конструкция может быть блочной, т.е. состоять из посадочных блоков, объединенных в группы, каждая из которых может иметь свой блок управления) составит около 9,5 м³. Габариты стандартной стойки космического корабля «Спейс Шаттл» составляют приблизительно 2054 мм × 842 мм × 1051 мм, поэтому общие габариты

оранжерейного устройства МЭЖ будут 2054 мм × 5270 мм × 1051 мм. Поскольку оранжерейное устройство имеет блочную конструкцию, оно может быть размещено и как единое целое, и как отдельные блоки в разных местах космического аппарата.

В таблице 1 представлен материальный баланс человека, полученный в ранее описанных наземных модельных экспериментах с биологическими системами жизнеобеспечения с участием испытуемых, проводившихся в ГНЦ РФ – ИМБП РАН. Из данных, представленных в таблице, видно, что суточная потребность человека в основных элементах питания (по сухому веществу) составляет около 550 г, при пересчете на 6 членов экипажа космического аппарата это составит около 3300 г. Производительность оранжерейного устройства должна составлять 600 г сырой биомассы в сутки или около 60 г сухой биомассы, а при пересчете на основные элементы питания растительная часть рациона восполнит лишь около 40 г в сутки. Потребление растений, выращенных в оранжерейном устройстве, позволит восполнить 540 г воды в сутки из 15000 г, которые необходимы для обеспечения жизнедеятельности экипажа из 6-ти человек.

Таблица 1 - Материальный баланс человека

ВХОД		ВЫХОД	
Наименование вещества	Количество вещества, г/сутки	Количество вещества, г/сутки	Наименование вещества
O ₂	755 ± 90	900 ± 90	CO ₂
Вода	2400 ± 240	1280 ± 210	Моча
		1340 ± 190	Вода через дыхание и потоотделение
Углеводы	314 ± 23	160 ± 10	Фекалии
Жиры	87 ± 12		
Белки	131 ± 16		
NaCl	10		
Другие минеральные соли	5		
Общий вес	3701 ± 450	3680 ± 510	Общий вес

Конвейерный посев салатных растений в оранжерейном устройстве с суммарной площадью 10 м² способен обеспечить поступление в СЖО в сутки от 180 до 210 г O₂, что составляет около 25 % от суточной потребности одного человека в кислороде. Эти данные базируются на результатах наземных исследований с биологическими системами жизнеобеспечения человека, проводившихся в ГНЦ РФ – ИМБП РАН и ИБФ СО РАН.

Расчеты показывают, что наличие оранжерейного устройства на борту космических аппаратов межпланетных миссий позволит обеспечить экипаж, состоящий из 6 человек, необходимыми биологически активными веществами (витаминами) и микроэлементами в биологически активной форме, а также регенерировать до 5 % необходимого кислорода, до 3,6 % воды и более 1 % основных элементов питания. Материальный баланс оранжерейного устройства включает в себя не только количество произведенных веществ, необходимых для человека, но также и материальные потоки, обеспечивающие функционирование данного устройства. К сожалению, в настоящее время эксплуатационные характеристики такого оранжерейного устройства не изучены. Оценить материальные потоки, необходимые для функционирования оранжерейного устройства в составе СЖО, можно, лишь опираясь на данные, полученные в экспериментах на борту ОК «Мир» с использованием оранжерейного устройства «Свет» и на борту РС МКС с использованием оранжерейного устройства «Лада», проведя соответствующую экстраполяцию.

На рисунке 6 представлены блок-схемы СЖО, основанные на системах и блоках, которые использовались на борту орбитальных космических станций. На рисунке 6А представлена блок-

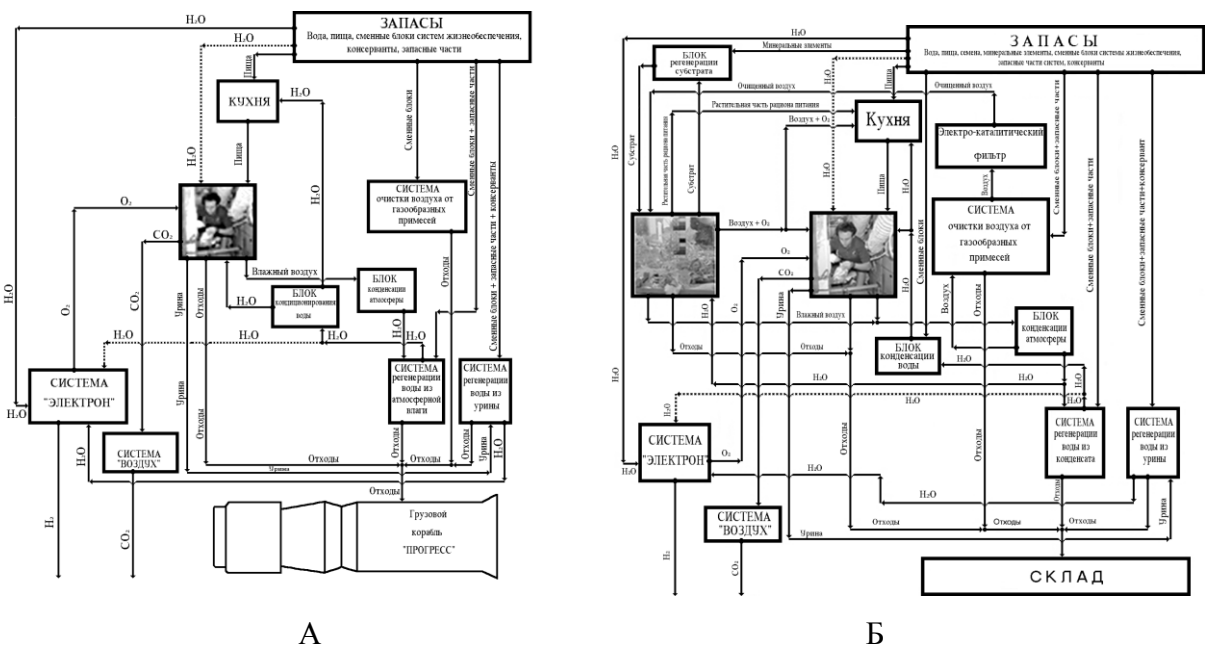


Рисунок 6 - Блок-схема СЖО ОК «Мир» (А) и изменения блок-схемы СЖО ОК «Мир» после включения в ее состав оранжереи (Б).

«Воздух» – система удаления CO_2 из атмосферы ОК

«Электрон» – система получение O_2 из H_2O

схема СЖО ОК «Мир», основанная на системах и блоках, которые используются частично и сегодня на борту РС МКС, а на рисунке 6Б блок-схема с включением в состав СЖО

оранжерейного устройства. Включение оранжерейного устройства приведет к созданию дополнительных блоков в СЖО космического аппарата. Так, эксперименты с высшими растениями на борту ОК «Мир» показали, что в атмосфере ОК происходит накопление низкомолекулярных углеводородов, которые не удаляются в штатных системах очистки воздуха от газообразных примесей. Для культивирования растений особенно критичным оказалось накопление этилена в атмосфере орбитального комплекса. При чем, ПДК этого вещества для человека составляет 20 мг/м^3 , тогда как растения начинают реагировать на присутствие этилена в атмосфере при концентрациях около $0,1 \text{ мг/м}^3$. Сорбционные системы очистки атмосферы не позволяют эффективно удалять этилен, поэтому необходимо включить в СЖО электрокаталитический метод очистки атмосферы от газообразных примесей. Данная система проходила испытания на борту ОК «Мир» во время 26 - 28 основных экспедиций. Наличие данной системы на борту ОК «Мир», по нашему мнению, явилось важным фактором, который позволил в экспериментах «от семени до семени» с растениями пшеницы получить два поколения «космических» семян, а также впервые вырастить салатные культуры и провести тестирование органолептических и вкусовых свойств растений космонавтами.

Для использования высших растений в СЖО гермообъектов в условиях длительной изоляции от биосферы Земли необходимо разработать технологии длительного функционирования оранжерейных устройств, когда совокупные ресурсы, предназначенные для функционирования СЖО, ограничены. С этой целью необходимо решить целый ряд задач, важной частью которых является задача создания технологии многократного использования корнеобитаемой среды для интенсивного культивирования высших растений без снижения их продуктивности и пищевых свойств растительной биомассы.

Большинство оранжерейных устройств, предназначенных для эксплуатации внутри гермозамкнутого объема, оснащены специальными устройствами (корневыми модулями, вегетационными сосудами) для обеспечения полноценного существования ризосферы растений в искусственной корнеобитаемой среде (обеспечение водой, кислородом, минеральными элементами, удаление углекислого газа). В настоящее время опыт наземных и космических исследований, в которых изучались технологии культивирования высших растений в условиях гермозамкнутого объема, не позволяет говорить о возможности длительной эксплуатации оранжерейных устройств без замены корнеобитаемой среды. Так, все ныне существующие технологии позволяют проводить не более 2-3 вегетаций высших растений в одной и той же корнеобитаемой среде. При этом наблюдается снижение продуктивности культивируемых растений во 2-ой и 3-ей вегетациях, что связано как с исчерпанием питательных веществ в корнеобитаемой среде, так и с накоплением в ней продуктов метаболизма растений. Для непрерывного культивирования растений внутри гермозамкнутого объема необходимо иметь

либо достаточный запас вегетационных сосудов (корневых модулей), либо проводить замену субстрата в них. Конструктивные особенности данных блоков оранжерейных устройств, а также требования безопасности внутри герметизированного объема, особенно в условиях невесомости, в большинстве случаев не позволяют проводить работы по замене субстрата, поэтому для обеспечения необходимой производительности оранжерейного устройства производится замена вегетационных сосудов (корневых модулей), что существенно увеличивает совокупную массу необходимых запасов СЖО. Например, вегетационный сосуд оранжерейного устройства «Свет» с посевной площадью 0,1 м², эксплуатировавшийся на борту ОК «Мир», в заправленном виде имел массу 13 кг.

Включение в СЖО системы регенерации субстрата является необходимым условием длительного функционирования оранжерейного устройства в качестве элемента СЖО. Технология регенерации субстрата применительно к условиям космического полета отсутствует, поэтому проведение исследований в этом направлении является одной из важнейших задач, при внедрении оранжерейных устройств в СЖО длительных космических экспедиций.

Наземные исследования высших растений в составе БСЖО человека показали, что при культивировании растений существенно увеличиваются потоки воды внутри системы. Показано, что конвейерный посев растений с 1 м² посевной площади испаряет до 5 литров воды в сутки. Исходя из этих данных, можно говорить о том, что суммарный объем воды, который будут испарять растения в оранжерейном устройстве с посевной площадью 10 м², составит около 50 литров в сутки. В экспериментах с высшими растениями на борту РС МКС в оранжерейной установке «Лада» было отмечено, что количество воды, которую испаряли растения при их выращивании в этой установке в условиях невесомости, составляло в среднем 250 мл в сутки. Посевная площадь оранжерейной установки «Лада» составляет 0,03 м². Пересчет этих данных применительно к оранжерейной установке с посевной площадью 10 м² дает результат, превышающий 80 литров испарившейся воды в сутки.

Различия в количестве воды, которые растения транспирируют в условиях Земли и в условиях реального космического полета, могут быть связаны с особенностями технологии культивирования. В частности, транспирация является необходимой функцией растительного организма, с ее помощью осуществляется теплообмен растительного организма. В условиях невесомости, где отсутствуют конвективные потоки, теплообмен может проходить лишь в условиях принудительного вентилирования посева растений, поэтому расчет необходимой и достаточной степени вентиляции посева является одной из задач дальнейших исследований технологии культивирования растений в условиях невесомости.

Количество воды испаряемой посевом растений в СЖО космического аппарата будет на порядок превышать количество воды, которые будут испарять 6 членов экипажа (9 литров) (табл. 1). Существующая на борту РС МКС «Система регенерации воды из конденсата атмосферной влаги» (СРВК) позволяет регенерировать 500 литров воды без замены очистных колонок, т.е. при регенерации воды испаряемой 6-ю членами экипажа космического аппарата, СРВК без замены очистных колонок будет функционировать более 50 суток. Включение в общий объем воды регенерируемой в СРВК, воды, испаряемой растениями, приведет к снижению ресурса СРВК в 10 раз. В связи с этим, возможно два решения данной проблемы. Первое, создания собственного контура воды оранжерейного устройства. Второе, прямое поступление конденсата атмосферной влаги после «Блока конденсации атмосферы» (БКА) в систему полива растений. По нашему мнению, второй путь является более предпочтительным, так как он существенно упростит оранжерейное устройство, обеспечит свободное расположение блоков оранжерейного устройства по всему объему космического аппарата, а также обеспечит открытый доступ членам экипажа к растениям, последнее, является весьма важным элементом в функционировании оранжерейного устройства, как элемента СЖО. Наш многолетний опыт проведения экспериментов с высшими растениями на борту орбитальных станций (10 основных экспедиций на борту ОК «Мир» и 17 основных экспедиции на борту МКС), а также в наземных экспериментах в гермообъемах, показывает, что ежедневные работы с зелеными растениями оказывали существенную психологическую поддержку космонавтам.

Таким образом, анализ материальных потоков звена высших растений СЖО для долговременных космических миссий и оранжерейного устройства в целом показывает, что необходимо решение целого ряда задач, связанных не только с собственно биологическими исследованиями на борту космической орбитальной станции, но также и с исследованиями технологических особенностей функционирования оранжерейных устройств на борту космических летательных аппаратов.

Вышеизложенная конфигурация СЖО базировалась на предположении, что ее основной будут системы, эксплуатирующиеся в настоящее время на борту орбитальных станций. Однако в случае разработки принципиально новых СЖО, предназначенных непосредственно для длительных межпланетных полетов, можно рассматривать варианты, когда в их состав будут включены биологические процессы в большем объеме, чем только оранжерейное устройство.

СЖО на основе биологического круговорота веществ, предназначенные для обеспечения жизнедеятельности человека вне биосферы Земли, можно разделить на 2 группы: СЖО межпланетных космических кораблей (МПКК) и СЖО планетарных баз. Общим для каждой группы объектов являются их массо-габаритные характеристики, гравитационные условия существования, а также возможные конструктивные решения при построении этих объектов.

Для СЖО МПКК основными ограничивающими факторами будут их массы и габариты, а также их энерговооруженность. Реализация на МПКК полномасштабной БСЖО, скорее всего, невозможна. При этом под полномасштабной БСЖО мы понимаем такую систему, где практически все материальные потоки будут обеспечиваться за счет биологических процессов. Физико-химические процессы в такой системе будут иметь вспомогательную роль, компенсируя отсутствие буферности (водного и воздушного океанов биосферы Земли) и тех или иных трофических связей внутри системы. СЖО для МПКК может представлять собой тот или иной вариант системы, где автотрофное звено будет представлено одноклеточными водорослями, с возможной комбинацией различных подсистем на основе биологической и физико-химической регенерации среды обитания. Существенным фактором, который будет во многом определять облик СЖО МПКК, является невесомость, что потребует создания специальных технических средств и технологических приемов, позволяющих обеспечить нормальную работу системы, особенно ее биологической составляющей. Выбор одноклеточных водорослей в качестве основного автотрофного звена СЖО МПКК определяется тем, что их популяции в отличие от высших растений обладают рядом очень важных свойств: наличием миллиардов особей, коротким циклом развития (часы), устойчивостью к воздействию неблагоприятных факторов, наличием процесса автоселекции в популяции, а также их полифункциональностью в качестве средообразующего звена, о чем говорилось выше.

Межпланетная экспедиция в течение длительного времени не будет иметь никакой связи с биосферой Земли, поэтому СЖО должна обладать высокой степенью надежности и должна быть полностью продублирована. Возможным путем создания резервов СЖО является путь установки на борту МПКК двух систем с различными механизмами регенерации среды обитания человека, т.е. СЖО, основанных и на физико-химических и на биологических процессах. СЖО на основе физико-химических и на основе биологических процессов, каждая по отдельности, должны быть способны полностью обеспечить потребности экипажа. В оптимальном режиме эти две системы должны функционировать одновременно, выполняя свой объем функции по регенерации среды обитания человека. Резервирование в этом случае будет заключаться в том, что в случае отказа одной из систем или резкого снижения ее функциональных возможностей, другая система сможет восполнить потери за счет увеличения ее доли в общем объеме регенерации среды обитания. Принципиальная схема построения СЖО, представленная на рисунке 7, основывается на том, что для утилизации урины с помощью одноклеточных водорослей необходимо иметь 30 %-ю производительность автотрофного звена от общей потребности экипажа в кислороде. В этом случае отпадает необходимость в консервации урины для ее дальнейшей переработки физико-химическими методами, так как ее разложение на аммиак и углекислоту, не приведет к загрязнению воздушного объема.

Для консервации одной порции урины требуется 10 мл смеси концентрированной H_2SO_4 и $K_2Cr_2O_7$ (хромпик). Если исходить из того, что в сутки от 6 членов экипажа будет поступать около 18 порций урины, то для 520-суточной экспедиции потребуются около 100 литров этой агрессивной жидкости. Водоросли же полностью поглотят продукты распада урины в процессе своего роста и развития. Поэтому предполагается, что в штатном режиме работы СЖО биологическая компонента система будет обеспечивать 100 % регенерацию воды, 30 % регенерацию кислорода и утилизацию CO_2 . В случае уменьшения производительности физико-

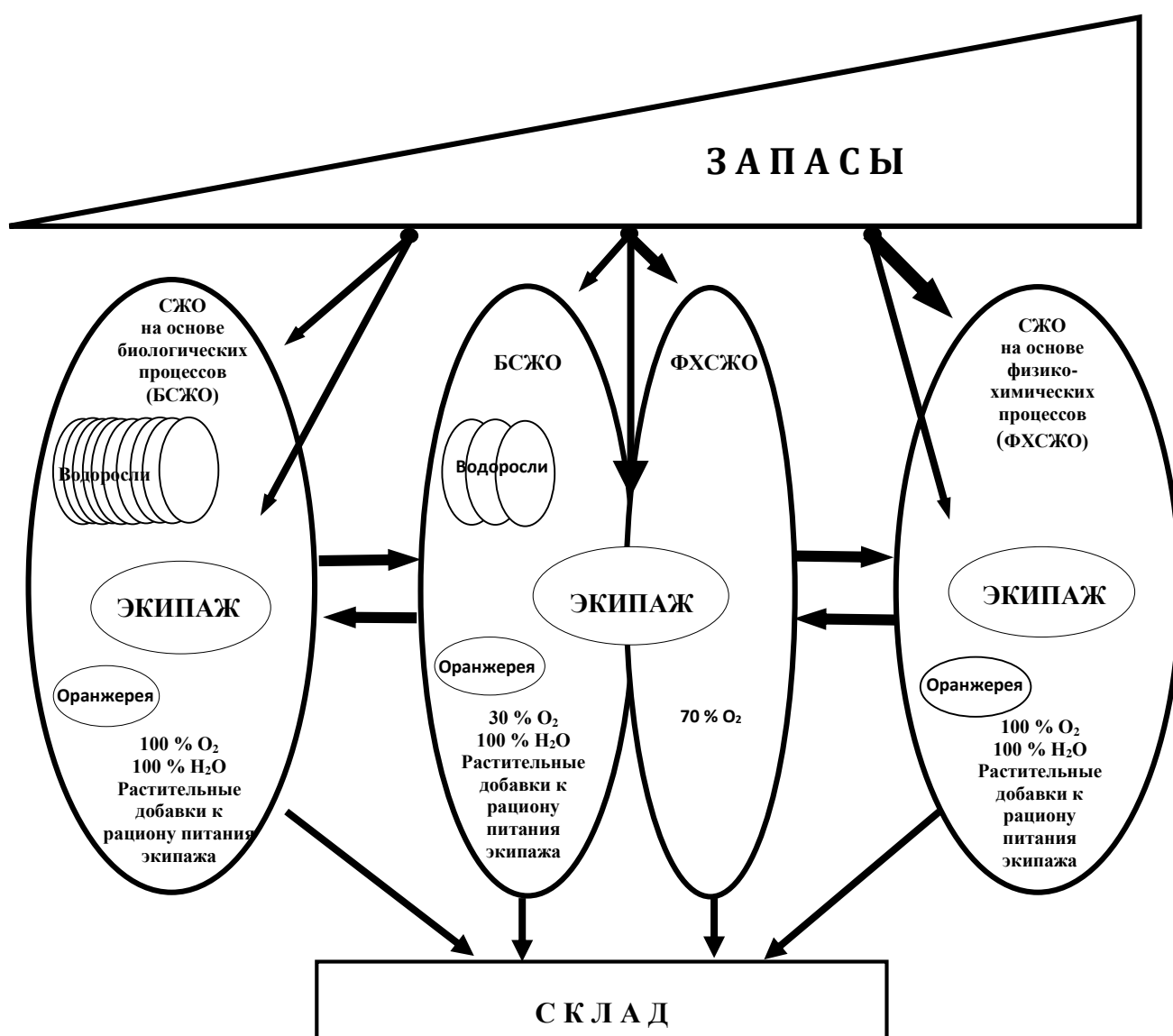


Рисунок 7 - Принципиальная схема построения СЖО МПКК

химической составляющей СЖО увеличение производительности до 100 % по кислороду звеном одноклеточных водорослей может быть достигнуто в течение суток. Объем запасов будет в основном определяться потребностями физико-химической СЖО, так как, основываясь на технологиях, которые применяются сегодня на орбитальных станциях, основным

источником кислорода для экипажа будет электролиз воды. При этом следует учитывать и тот факт, что вода может являться также защитой от радиации и уменьшение ее объемов крайне нежелательно. Безусловно, данная схема весьма приблизительна, необходима более детальная ее проработка, проведение целого комплекса исследований, особенно переходных процессов, когда будет происходить наращивание производительности одной из составляющих СЖО. Однако, по нашему мнению, такая компоновка СЖО МППК позволит решить целый ряд задач, в том числе и задачу надежности функционирования СЖО при длительном отсутствии какой-либо связи с биосферой Земли, а также задачу обеспечения адекватных потребностям человека условий среды обитания.

Планетарные базы - объекты, для которых общим является то, что они существуют на поверхности космических тел, где есть гравитация. Теоретически для этих объектов не столь важны массо-габаритные характеристики СЖО.

Для Луны, где полностью отсутствует атмосфера и вода (воды, которая находится в лунных породах слишком мало, чтобы принимать ее в расчет), где требуется защита сооружений базы от метеоритного потока, а также серьезная радиационная защита, создание долговременной базы на лунной поверхности нецелесообразно, а размещение базы под поверхностью, скорее всего, невозможно из-за высокого уровня вторичной радиации. Видимо потребуются обеспечить недолговременное пребывание человека на поверхности Луны для проведения каких-нибудь особенных работ, которые неспособны осуществить роботизированные комплексы. Для этого будет достаточно иметь сооружения на поверхности, имеющие необходимые запасы или устройства для обеспечения пребывания человека непродолжительное время.

В отличие от Луны наиболее вероятным является создание долговременной марсианской базы (ДМБ). При рассмотрении вариантов систем жизнеобеспечения ДМБ можно исходить из того, что в отличие от Луны, на Марсе есть ресурсы, которые можно использовать для обеспечения жизнедеятельности человека или функционирования систем жизнеобеспечения. На Марсе есть углекислота, кислород, вода, поэтому вполне возможно создание системы жизнеобеспечения ДМБ, в которой будут использоваться ресурсы планеты. Однако сегодня неясно может ли человек использовать в качестве источника обеспечения своей жизнедеятельности вещества «марсианского» происхождения. Решение этого вопроса в будущем будет являться самостоятельной задачей, которая будет решаться уже в процессе освоения Марса, то есть после создания ДМБ. Поэтому, при создании ДМБ необходимо решать основную проблему – создание биологической системы в качестве системы жизнеобеспечения человека.

Какой будет система жизнеобеспечения ДМБ, во многом зависит от того, где она будет располагаться, какова будет ее энерговооруженность, ее площадь. В частности, были проекты создания на Марсе ДМБ в виде модели биосферы Земли (комплекс «Биосфера-2», о котором шла речь ранее). Создание на Марсе модели биосферы Земли и использование ее в качестве ДМБ, на наш взгляд, нереально. Не касаясь даже вопроса правомочности такого моделирования и возможности длительного существования такой системы, следует обратить внимание на условия, которые существуют на поверхности Марса. В частности, неясно сможет ли солнечная радиация, достигающая поверхности Марса, обеспечить нормальный фотосинтез растений. На Марсе частое явление песчаные бури, которые поднимают в атмосферу большое количество мельчайшей пыли, что резко снижает освещение на поверхности планеты. Сильные ветры, большая разность температур снаружи и внутри, высокий уровень вторичной радиации, гипомагнитная среда, все эти факторы серьезно затрудняют создание ДМБ на основе биогенных механизмов, но без них создать ДМБ невозможно.

Построение и начало функционирования ДМБ может быть осуществлено без участия человека. Человек может стать частью системы жизнеобеспечения ДМБ уже после ее построения. Достичь этого можно благодаря использованию ресурсов Марса - углекислоты, кислорода, воды. Схема разворачивания ДМБ представлена на рисунке 8.

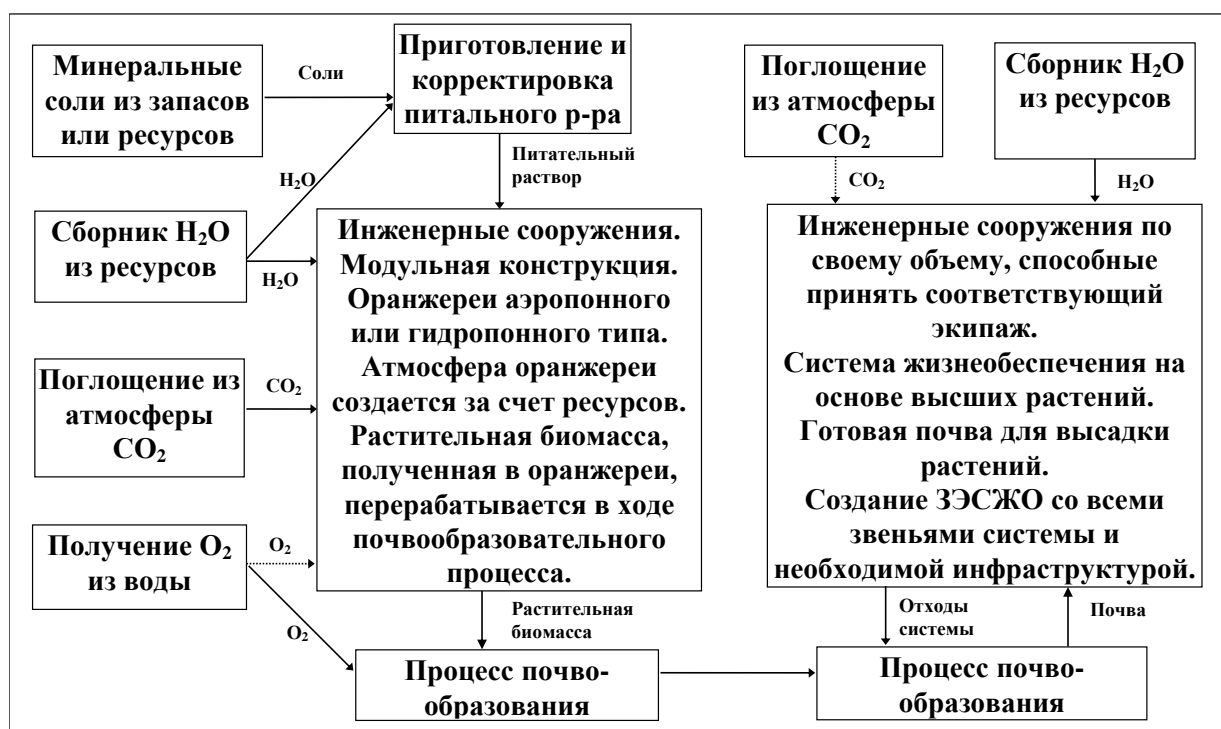


Рисунок 8 - Принципиальная схема разворачивания ДМБ на основе БСЖО.

С момента начала строительства ДМБ необходимо начать выделение из атмосферы Марса углекислоты, воды и получение из нее кислорода. Полученные запасы этих веществ начнут использоваться с момента окончания строительства базы или ее части, когда будет создано изолированное помещение, в котором можно начать выращивать растения. Полученная биомасса растений будет использоваться в почвообразовательном процессе (до того как появиться ее потребитель). Таким образом, к моменту появления в ДМБ ее экипажа она будет обладать уже достаточно сформировавшейся системой жизнеобеспечения. Окончательное формирование всей системы жизнеобеспечения ДМБ будет проходить при непосредственном участии человека. На Марсе развитие автотрофного звена ДМБ не зависит в такой степени от количества углерода, который поступает от гетеротрофных организмов, поэтому развитие ДМБ и ее расширение может продолжаться постоянно.

В простых, упрощенных вариантах БСЖО функцию гетеротрофного звена как метаболического антипода растений выполняет человек. Однако структура его пищевого рациона требует включения в состав системы других гетеротрофов – продуцентов животного белка. Диапазон выбора гетеротрофного звена весьма велик и в принципе охватывает все царство животных – от простейших до млекопитающих. К выбору животных для БСЖО предъявляются определенные требования: высокая удельная продуктивность и энергетическая эффективность, минимальная доля непотребляемой человеком биомассы, наличие вторичной продукции (яйца, молоко), высокие диетические показатели продукции и др. До настоящего времени разработка гетеротрофного звена находится на стадии теоретического рассмотрения и наземных экспериментов. Первые попытки исследования этого вопроса в реальных космических полетах были предприняты в экспериментах «Инкубатор», «Аквариум» и «Аквариум-АQN».

Включение любых организмов в состав БСЖО предполагает, прежде всего, разработку технологии их высокопродуктивного культивирования в составе системы. Это верно как для условий Земли, так и для условий невесомости, где эта проблема является первоочередной. Любое звено системы, автотрофное или гетеротрофное, представляет собой популяцию организмов, которая должна неограниченно долго существовать в искусственных условиях в тесном взаимодействии с другими звеньями (популяциями организмов) системы. Устойчивое существование популяций во времени определяется тем, как полно обеспечены потребности каждого из организмов, входящих в популяцию, и могут ли организмы размножаться, чтобы поддерживать популяцию на стационарном уровне. Исходя из этого, первым шагом в исследованиях гетеротрофного звена БСЖО в условиях невесомости было исследование онтогенеза животных в этих условиях.

В качестве гетеротрофного звена специалистами предлагались различные гетеротрофные организмы: моллюски, рыбы, птицы, козы, мини свиньи. В ИМБП под руководством **Евгения Яковлевича Шепелева** разработкой гетеротрофного звена БСЖО на основе птиц японского перепела первоначально занимался **Владимир Федорович Мищенко**, в дальнейшем эти работы возглавила **Тамара Сергеевна Гурьева**. Выбор птиц японского перепела в качестве возможного компонента БСЖО связан с тем, что они в большей степени отвечают требованиям, которые перечислены выше.

Поскольку японский перепел является объектом сельскохозяйственного производства, его биологические свойства и его потребности достаточно хорошо изучены. Применительно к БСЖО велись исследования по включению в корма для птиц продукции растительной части системы, исследования птиц в замкнутой системе, однако наиболее важным являлся вопрос, связанный с возможностью поддержания популяции птиц в условиях космического полета.

Первой стадией онтогенетического развития организма является эмбриогенез. К началу исследований с птицами японского перепела, единственным свидетельством того, что в условиях невесомости возможно нормальное прохождение эмбрионального развития животных организмов, были результаты эксперимента с яйцами японского перепела, проведенного на борту биоспутника «Космос-1129». Однако длительность полета и методика проведения эксперимента на беспилотном космическом аппарате не позволяли получить в результате инкубирования живых птенцов. Факт наличия в полетном варианте эксперимента эмбрионов, соответствующих 14-дневному сроку развития (длительность экспозиции в невесомости составила 14 суток) указывал на то, что невесомость не препятствовала нормальному делению клеток и образованию органов у зародышей. Однако оставалось неясным, как в условиях невесомости совершится переход от эмбрионального состояние в состояние свободно живущего организма. В КЭ «Инкубатор» на борту ОК «Мир» впервые удалось показать, что в целом этот переход может проходить и в условиях невесомости. Птенцы вылуплялись.

Анализ результатов инкубирования яиц перепела, оплодотворенных на Земле, но прошедших весь цикл эмбрионального развития в условиях невесомости, показывает, что невесомость не является абсолютным препятствием на пути эмбрионального развития птиц. Этот вывод можно считать окончательным. Отсутствие прямого действия невесомости на процесс превращения оплодотворенной яйцеклетки в самостоятельно живущий организм является важным подтверждением того, что биологические свойства популяции не подвержены ее прямому действию, поэтому первоначальные опасения в отношении возможности нормального эмбриогенеза в невесомости были, по-видимому, чрезмерными.

Это общий вывод по результатам КЭ «Инкубатор», в которых изучался эмбриогенез птиц в условиях невесомости. Однако из результатов этих экспериментов можно сделать и другие выводы:

- в условиях космического полета повышается частота возникновения аномалий развития эмбрионов;
- в условиях космического полета наблюдается большая гибель эмбрионов на разных стадиях развития;
- в условиях космического полета не наблюдается корреляции между числом аномалий развития эмбрионов и их общей смертностью;
- в условиях космического полета расположение эмбриона в яйце имеет случайный характер, поэтому часть эмбрионов, располагаясь головой в остром конце яйца, не может самостоятельно покинуть его;
- в условиях космического полета наблюдается отставание роста и развития эмбриона на начальных стадиях эмбриогенеза.

Все эти выводы говорят о том, что существует какой-то фактор (совокупность факторов) космического полета, который оказывает воздействие на развитие эмбрионов. Основной вывод однозначно говорит о том, что этим фактором не может быть невесомость в том смысле, что само наличие невесомости не оказывает влияния на процесс эмбриогенеза. Рассматривая частные выводы, которые были сделаны в результате исследований в их совокупности, можно предположить, что причиной всех этих явлений являются изменения условий развития эмбрионов (при этом, эти изменения могут иметь место как внутри яйца, так и вне).

Эксперименты по исследованию эмбриогенеза птиц в условиях космического полета показали, что эмбриональное развитие - процесс, имеющий две взаимосвязанные характеристики: рост и дифференцировку - не зависит от условий невесомости. Многие факты, которые были обнаружены в этих экспериментах, говорят о том, что необходимо проведение новых экспериментов на новом методическом уровне. В ближайшем будущем планируется возобновить исследования эмбрионального развития японского перепела в КЭ на борту РС МКС. Планируется использовать новое поколение оборудования, разработанного и изготовленного в СКТБ Биофизприбор под руководством **Анатолия Олеговича Белгородского** совместно со специалистами ИМБП (**Андрей Иванович Пахомов, Тамара Сергеевна Гурьева, Ольга Алексеевна Дадашева**), и, в котором инкубирование яиц птиц будет одновременно проходить в условиях невесомости и в условиях искусственной гравитации.

Первое появление новорожденных птенцов японского перепела в условиях невесомости сразу же выявило новую проблему в гравитационной биологии – проблему адаптации

новорожденных организмов к условиям невесомости. Исследования поведения новорожденных птенцов японского перепела в условиях невесомости показали, что они не могут самостоятельно существовать в этих условиях. Проблема выживания новорожденных организмов в условиях невесомости во многом связана с поведенческими реакциями организмов и их зависимостью от наличия точки опоры. В случае с японским перепелом, эта зависимость абсолютна, как у любого организма, движение которого связано с преодолением силы тяжести (ходьба) путем отталкивания от твердой поверхности (опорная среда). Наблюдения за поведением птенцов, показали, что все их врожденные инстинкты могут реализоваться только в случае их ориентирования в пространстве. В условиях Земли основным фактором, обеспечивающим ориентацию птенцов, является гравитация. Отсутствие возможности найти точку опоры с первых минут жизни вне яйца приводит к полной дезориентации птенца, что влечет за собой обесценивание всех врожденных инстинктов. Дезориентацию новорожденных организмов в условиях невесомости мы наблюдали и у рыб. Мальки рыб, рожденные в невесомости, не могут найти раздел фаз воздух-вода, чтобы заглотнуть воздух и наполнить плавательный пузырь. Важно отметить, что взрослые птицы и взрослые рыбы способны адаптировать свое поведение в условиях невесомости.

Проблема адаптации новорожденных организмов в условиях невесомости является одной из ключевых проблем при реализации гетеротрофного звена БСЖО, поскольку для будущих напланетных баз потребуется доставка животных через космическое пространство. Конечно, в будущем вполне возможна доставка покоящегося биологического материала, из которого уже на напланетной базе будет создаваться популяция гетеротрофных организмов или получение животного белка. Это фантазии, но развитие науки идет стремительно, поэтому уже существующие современные технологии, позволяют предполагать такое.

Однако наши сегодняшние знания о межпланетном пространстве, о пределах выживаемости биологической материи в этом пространстве очень скудны. Есть результаты КЭ, в которых показано, что даже в состоянии криптобиоза, когда из клеток практически вытеснена вся вода, клетки способны помнить о нахождении в условиях космического полета внутри орбитальной станции. Как показали результаты КЭ с эфипиями рачков дафний, проводившемся **Виктором Ростиславовичем Алексеевым** из Зоологического института РАН совместно со специалистами ИМБП, после реактивации эфипий на Земле наблюдается ответ популяции рачков на месячное пребывание в неактивном состоянии эмбриональных клеток в условиях орбитального полета.

Исследования, связанные с созданием БСЖО, в наземных экспериментах продолжаются и сегодня. Это, в большей степени, исследования элементов БСЖО, в частности, звена высших растений. Выше уже говорилось о том, что оранжерея с высшими растениями будет первым

элементом биологической системы, которая будет внедряться на борт космических аппаратов (частично это происходит и сейчас, но это пока только исследовательские оранжереи). В связи с этим, существует необходимость разработки основных проектных параметров будущих производственных оранжерей применительно к условиям долговременной эксплуатации в составе СЖО космических аппаратов. Такого рода работы велись и ведутся под руководством **Маргариты Александровны Левинских** в рамках наземных экспериментов по имитации космических полетов («ЭКО-ПСИ-95», «SFINCSS-99», «Марс-500», «Жара», «Луна-2015», «СИРИУС»), где решаются следующие задачи:

1. Выбор пространственной компоновки, мощности, конструктивных и технологических решений для производственной оранжереи.
2. Испытание разработанных элементов конструкции оранжереи и методик культивирования овощных растений в условиях имитации космического полета:
 - а) выбор сортов и видов овощных растений, отличающихся высокой скоростью нарастания биомассы, хорошими вкусовыми качествами и привлекательным внешним видом;
 - б) исследование роста, развития и метаболизма растений в условиях длительного непрерывного культивирования в обитаемом гермообъекте;
 - в) сравнение продуктивности растений при использовании различных источников освещения;
 - г) определение максимального количества выращенной биомассы растений и количества возможных вегетаций в случае длительного использования вегетационного сосуда оранжереи без замены субстрата.
3. Получение растительных пищевых добавок к рациону питания членов экипажа в условиях имитации космического полета.
4. Исследование диетологических предпочтений членов экипажа при наличии выбора растительных культур.
5. Оценка качества растительной биомассы по показателям обсемененности растений микроорганизмами и по содержанию нитратов и витаминов.
6. Разработка методов безопасного пищевого потребления биомассы растений человеком в условиях космического полета.
7. Разработка и апробация методических подходов для оценки психологических факторов воздействия вегетирующих растений на членов экипажа в условиях длительного пребывания в гермообъекте.
8. Исследование системы «оператор-оранжерея-растения» в зависимости от личностных характеристик испытателей, разработка возможных алгоритмов эксплуатации производственного оранжерейного устройства при длительных межпланетных полетах.

БСЖО человека – это не только получение всех необходимых для его существования веществ, это и важный психо-эмоциональный фактор. **Михаил Алексеевич Новиков** (1928-2002 гг.) считал, что включение биологических объектов в системы обитания связано, не столько с удовлетворением утилитарных потребностей в еде или витаминах, сколько с глубинными потребностями человека в общении с живым. ИМБП явился одним из пионеров проведения экопсихологических исследований, и хотя точка зрения М.А.Новикова о роли биологических объектов в СЖО достаточно спорна, в экспериментах в гермообъемах с участием человека под руководством **Вадима Игоревича Гущина** было показано:

1. Степень вовлеченности в работы по Оранжерее определяет величину и направленность экопсихологического эффекта присутствия в гермообъекте высших растений. Большая вовлеченность в работы по уходу за растениями приводит к более положительному эффекту растений на психо-эмоциональное состояние членов экипажа.

2. Личностные особенности членов экипажа влияют на степень их вовлечения во взаимодействие с растениями. Обследуемые с высокой психологической устойчивостью (низким нейротизмом) и доминированием интроверсии более склонны к взаимодействию с растениями.

3. Удаленное расположение объекта Оранжерея от мест рекреации снижает экопсихологический эффект от его присутствия в гермообъеме. В тоже время, расположение в кают-компаниях устройства Аэрогарден имеет позитивный психологический эффект. С целью максимизации положительного влияния растений на психологическую рекреацию следует использовать не требующие большого ухода цветы яркой окраски и большого размера.

4. При решении вопросов о выборе выращиваемых в гермокамере растений для их последующего включения в рацион питания автономного экипажа, следует учитывать культурно обусловленные предпочтения его членов.

В целом эксперименты с высшими растениями в условиях обитаемых гермообъемов дают неопределимую информацию о том, как должна функционировать оранжерея на борту космических аппаратов, можно ли обойтись только витаминной зеленью для обеспечения экипажа витаминами и микроэлементами, что захотят выращивать члены экипажа для потребления и не только. От решения этих и других вопросов будет зависеть не только конструкция оранжереи (ей), но и в целом всей СЖО, а, соответственно, и космического аппарата.

Исследования в области создания БСЖО это, без преувеличения, исследования практически во всех областях биологической науки и не только. Выше говорилось, какой был широкий спектр участников в программе создания БСЖО. Конечно, идеи пионеров космонавтики о скорых полетах к другим планетам пока так и не осуществились, однако, когда

человечество начнет осваивать дальний космос проблема БСЖО снова выйдет на первый план, без такой системы человек не сможет оторваться от Земли. Однако и сегодня продолжают работы по этому направлению, пусть не в том объеме, что ранее, но результаты, полученные в исследованиях, вносят свой вклад в решение задач будущего.

В заключении хочу выразить благодарность всем, кто под руководством **Василия Васильевича Парина, Олега Георгиевича Газенко, Анатолия Ивановича Григорьева** непосредственно принимал и принимает участие в работах по изучению и созданию биологических систем жизнеобеспечения в ГНЦ РФ – ИМБП РАН, это:

Ирина Анатольевна **Абакумова**, Александр Львович **Агре**, Тамара Петровна **Алехина**, Аида Андрониковна **Антонян**, Мария Васильевна **Вильямс**, Тамара Борисовна **Галкина**, Роза Оганезовна **Геодокян**, Тамара Сергеевна **Гурьева**, Борис Георгиевич **Гусаров**, Ольга Алексеевна **Дадашева**, Всеволод Петрович **Дадыкин**, Тамара Алексеевна **Дерендяева**, Тамара Владимировна **Ерофеева**, Ирина Евгеньевна **Иванова**, Андрей Иванович **Козаков**, Елена Михайловна **Кондратьева**, Ирина Валентиновна **Крючкова**, Елена Владимировна **Лебедева**, Елена Константиновна **Лебедева**, Маргарита Александровна **Левинских**, Эмма Васильевна **Максимова**, Елена Ивановна **Медникова**, Ганна Иосиповна **Мелешко**, Николай Иванович **Михайлов**, Владимир Федорович **Мищенко**, Елена Леонидовна **Нефедова**, Валентин Ильич **Павловский**, Игорь Григорьевич **Подольский**, Василий Васильевич **Попов**, Владимир Иванович **Рождественский**, Владлен Михайлович **Симонов**, Владимир Николаевич **Сычев**, Владимир Иванович **Фофанов**, Ирина Викторовна **Цветкова**, Сергей Иванович **Цитович**, Лола Собировна **Чернова**, Юрий Иванович **Шайдоров**, Борис Николаевич **Шебалин**, Евгений Яковлевич **Шепелев**, Владимир Иванович **Яздовский**.

Всем сотрудникам ГНЦ РФ – Института медико-биологических проблем РАН, которые участвовали и участвуют в работах по созданию БСЖО.

Особая благодарность **российским космонавтам**, самоотверженная работа которых на борту орбитальных станций «Салют», орбитального комплекса «Мир», Российского сегмента Международной космической станции, позволила получить уникальную информацию, без которой невозможно оценить перспективы использования биогенных механизмов в системах жизнеобеспечения человека.

Благодарность **ученым и специалистам** большого числа научных и производственных учреждений и организаций нашей страны, которые принимали участие в работах по созданию биологических систем жизнеобеспечения человека на протяжении всех 60-ти лет.