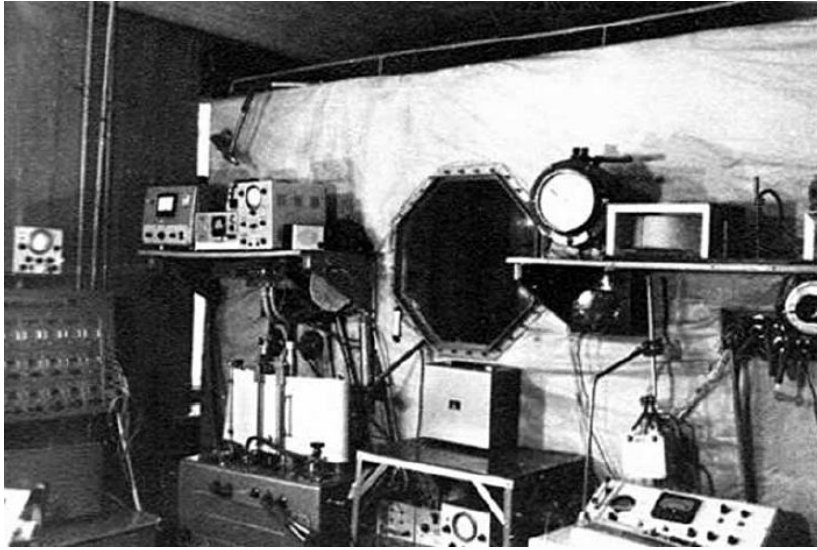


2.2. Системы жизнеобеспечения с полной замкнутостью потоков вещества

Программа «Биос», Институт биофизики СО РАН

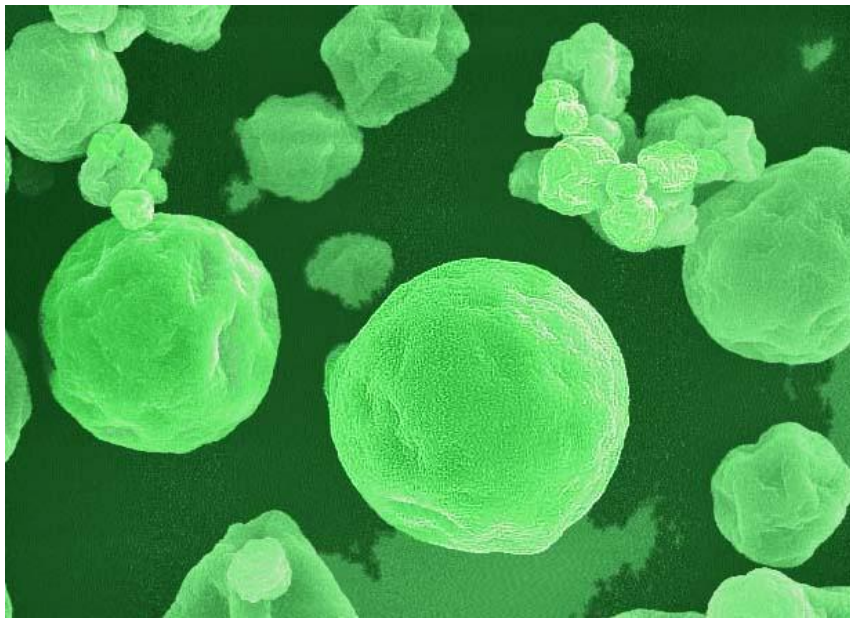


В 1964 г. (в год публикации последней рукописи Циолковского) началось практическое создание замкнутых искусственных экологических систем, включающих человека. В Красноярске, в Институте биофизики Сибирского отделения РАН (тогда – отделе биофизики Института физики СО АН СССР им. Л.В. Киренского) началась работа по строительству установки «Биос-1».

Первой задачей являлась организация взаимодействия человека и одноклеточных микроводорослей. Поэтому установка представляла собой два основных звена: герметичную кабину объемом 12 м³ с человеком внутри и специальный культиватор объемом 20 л для выращивания микроводоросли хлореллы обыкновенной.

По итогам семи экспериментов длительностью от 12 ч до 45 суток удалось достичь важного результата – полного замкнутого цикла газообмена. Весь выдыхаемый человеком воздух очищался от углекислого газа и других примесей и обогащался кислородом, вырабатываемым хлореллой. Так же, хлорелла позволила наладить замкнутый водооборот, включая регенерацию воды для питья, приготовления пищи и гигиенических процедур.





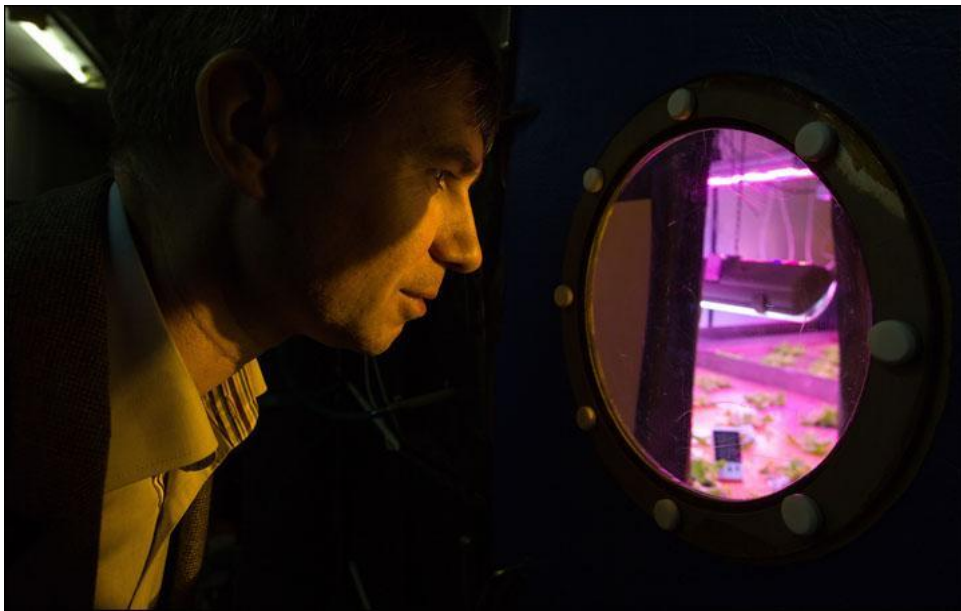
Хлорелла обыкновенная.

Одноклеточная зелёная водоросль сферической формы, размером 2-10 мкм



Всего 20 литров культуры *Chlorella vulgaris*, при искусственном освещении тремя 6-ти киловаттными ксеноновыми лампами, было достаточно для обеспечения одного человека-испытателя кислородом и удаления углекислоты, причем урина использовалась для подкормки водорослей. С замыканием системы по газообмену время пребывания в замкнутом объеме было доведено с 12 часов до 30 суток. Позднее был замкнут и водообмен, что позволило провести 45-суточный опыт. Опыты продолжительностью дольше 45-суток не получались. т.к. водорослям не хватало некоторых биогенных элементов и их дальнейший рост прекращался. Поэтому в 1966 г. были начаты эксперименты в трехзвенной системе «человек – микроводоросли – высшие растения» на установке Биос-2. Для этого к существующей камере Биос-1 было пристроено второе помещение – фитотрон объёмом 8 м³. В нем размещались высшие растения – сначала овощные культуры, а затем и пшеница, – рассматриваемые как средство регенерации атмосферы и источник пищи.

← Пульт управления биологическими и медицинскими параметрами в установке «Биос-2»



Это повысило замкнутость массообменных процессов в системе за счет частичного вовлечения в круговорот растительной пищи, включенной в рацион питания человека. Кроме того, высшие растения, как и хлорелла, участвовали в регенерации атмосферы для дыхания людей. Это позволило снизить биомассу хлореллы, необходимой для поддержания жизнедеятельности экипажа. Водоросли обеспечивали восстановление воздушной среды примерно на 72 %, а высшие растения – на 28 %.

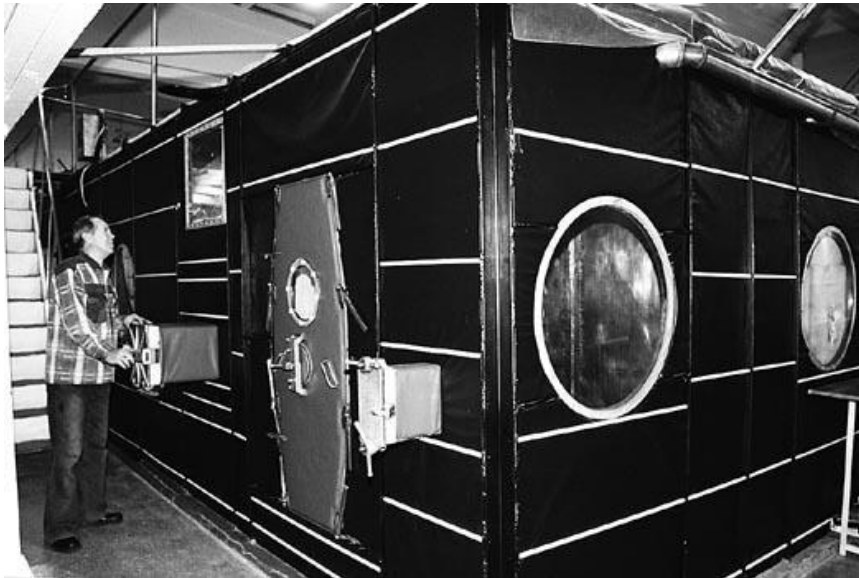
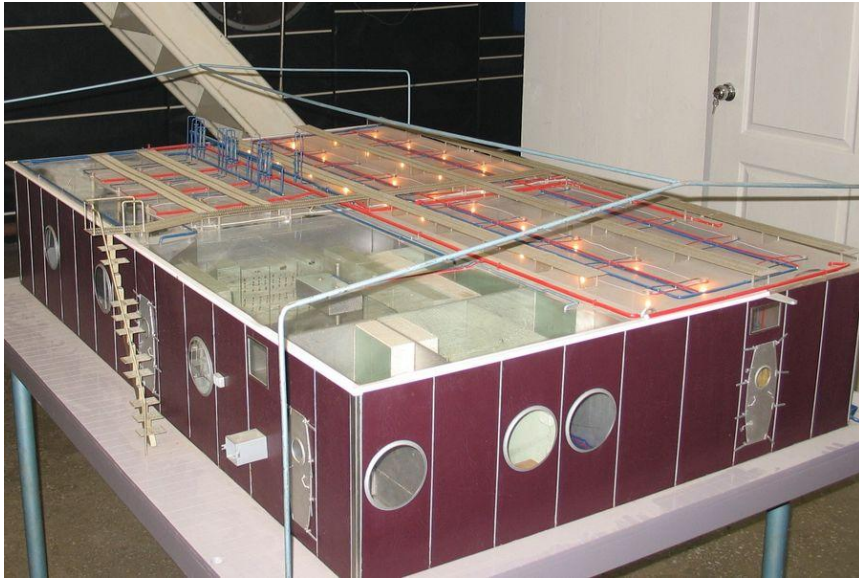


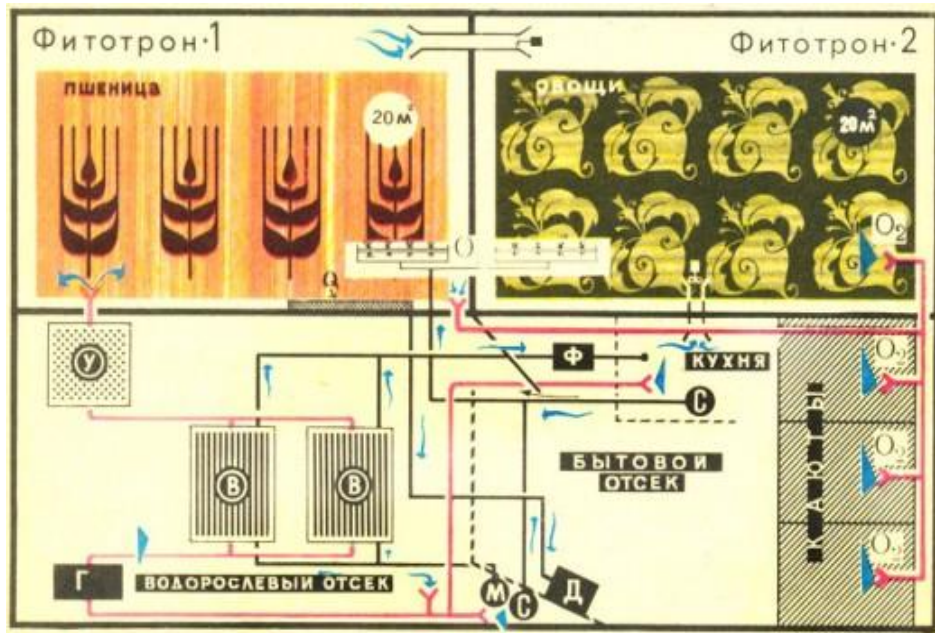
Поскольку за счет фотосинтеза высших растений продуцировался дополнительный объем кислорода, удалось провести эксперименты с экипажем из двух испытателей, наиболее продолжительные из которых длились 30 и 73 суток, а также 90-суточный эксперимент. В двух последних в качестве четвертого звена был добавлен микробный культиватор для переработки кала. С учетом повторного использования воды был достигнут 85 % уровень замкнутости системы.

Работы в «Биос-2» продолжались до 1970 г. По их результатам впервые в мире была доказана возможность длительного функционирования искусственной системы «человек-микроводоросли-высшие растения». Работы в Биос-2 послужили основой для ввода в строй полномасштабной установки Биос-3 с целью получения замкнутой экологической системы жизнеобеспечения человека с автономным управлением.

В 1972 г. были начаты работы на установке «Биос-3» с проведением экспериментов по полной изоляции людей от внешней среды. Эксперименты доказали возможность получать необходимые человеку питание, кислород и воду от биологических видов высших и низших растений.

Установка «Биос-3» представляет собой герметичное помещение объёмом 315 м³, которая находится в подвале здания Института биофизики СО РАН в Красноярске. Энергоснабжение осуществляется от электросети института, охлаждение производится проточной водой, забираемой непосредственно из Енисея. Для выращивания растений используются ксеноновые дуговые лампы ДКсТВ общей мощностью 240 кВт. Установка Биос-3 была рассчитана на пребывание в течение года до шести испытуемых. В ней прошли три длительных эксперимента с экипажами из двух и трёх человек.





Внутреннее пространство установки разделено на четыре отсека: два предназначены для выращивания высших растений методом гидропонии, один отсек занимают культиваторы хлореллы для производства кислорода и очистки воды, а последний отсек служит жилым помещением.

Буквами обозначены: В — культиваторы микроводоросли хлореллы, Г — газодувка, У — угольный фильтр, С — сборники сточной воды в кухне и туалете, Q — коллектор отбора конденсата влаги в фитотроне, Д — емкость для кипячения и хранения бытовой воды, М — коллектор мочи, Ф — узел сорбционной доочистки питьевой воды.

Пути движения газов в установке показаны красными линиями, воды — черными. Голубыми стрелками показано направление движения потоков вещества.

В фитотронах, при искусственном освещении, выращивались специальные сорта пшеницы, сои, салата, среднеазиатской масличной культуры чуфы, моркови, редиса, свеклы, картофеля, огурцов, щавеля, капусты, укропа и лука. Также в пищу использовались консервы с продуктами животного происхождения.





Николай Бугреев, Владислав Терских и Николай Петров готовятся к 6-месячному эксперименту в комплексе Биос-3



В жилом отсеке располагались три каюты членов экипажа, кухня-столовая, санузел, отсек управления и рабочая зона – мастерская-лаборатория с оборудованием для переработки урожая, утилизации несъедобной биомассы и ремонтных работ, а также системами доочистки воды и воздуха. Отсеки соединялись герметизируемыми дверями, доступ во внешнюю среду был возможен через воздушный шлюз. Управление системами установки осуществлялось автономно – экипажем.

Всего на установке «Биос-3» было проведено десять экспериментов-заселений самой разной продолжительности. Самый длительный эксперимент по полной непрерывной изоляции людей продолжался 180 суток. К концу 80-х годов в опытах удалось достичь полной, 100% замкнутости ИЭС по газообмену и 95% замкнутости по водообороту.

Потребности экипажа в пище на 80% удовлетворялись съедобными частями растений-продуцентов. В среднем, на каждого из трех испытуемых в сутки приходилось 200 г зерна и 388 г свежих овощей. Часть зерна отбиралась на семена и для анализа, а из оставшегося выпекали хлеб.

◀ Ежедневный анализ крови



академик Иосиф Исаевич Гительзон и профессор Генрих Михайлович Лисовский в фитотронном отсеке установки Биос-3.



Сбор «урожая»

Отсеки-фитотроны имели суммарный объем 150 м^3 при посевной площади $40,8 \text{ м}^2$. Каждый из них освещался 20 дуговыми ксеноновыми лампами ДКсТВ-6000 мощностью по 6 кВт с водным охлаждением, свет которых близок к естественному солнечному как по интенсивности, так и по спектру. В них высаживалась карликовая пшеница (на площади 34 м^2) и овощные культуры: соя, салат, морковь, редис, репа, свекла, картофель, огурцы, щавель, капуста, укроп и лук.

Карликовая пшеница сорта 232, специально выведенная Г.М. Лисовским выращивалась в непрерывной воздушной субиригационной культуре, овощи – по методу гидропоники на керамзите, то есть в водном растворе минеральных солей. В обоих случаях был реализован «возрастной конвейер»: пшеница высаживалась участками из 14 различных возрастов, овощи – из 6 возрастов. Каждый из трех культиваторов хлореллы площадью светоприемной поверхности 10 м^2 освещался шестью лампами.

Пшеничное «поле» могло вырабатывать в сутки до 1500 л кислорода, а культиваторы с хлореллой – 2000 л, что было достаточно для жизнеобеспечения трех и четырех человек соответственно.



Обмолот пшеницы



Получение муки

Конденсат испаренной влаги из отсеков с фитотронами проходил кипячение и дополнительно перерабатывался на ионообменных смолах и активированном угле до состояния, пригодного для питья. От микробного культиватора для разложения кала отказались по медицинским соображениям, и твердые отходы человеческой жизнедеятельности высушивались и удалялись. Жидкие отходы проходили минерализацию (разложение на окислы, минеральные соли и воду) и удалялись, либо могли идти на корм хлорелле и на полив пшеницы. Сточно-бытовая вода поступала в питательные растворы пшеницы и овощей.

Самый длительный и известный эксперимент занял 180 суток – с 24 декабря 1972 г. по 22 июня 1973 г. – и состоял из трех этапов. Два первых месяца регенерацию атмосферы обеспечивали только высшие растения (пшеница и девять видов овощных культур), причем сточные воды шли на полив пшеницы. После этого вместо фитотрона № 2 был подключен отсек с культиваторами хлореллы, в которые направлялись жидкие выделения. Еще через два месяца в фитотроне № 2 была организована витаминная оранжерея, а фитотрон № 1 закрыт.

В соответствии с этапами эксперимента менялся и состав экипажа.



Замешивание теста



Конечный продукт

Эксперимент начинали агроном Мария Петровна Шиленко, инженер Владислав Владимирович Терских и врач Николай Иванович Петров. В феврале 1973 г. агронома заменил инженер-механик и технолог по культивированию водорослей Николай Иванович Бугреев, а в апреле 1973-го в экипаж вернулась М. П. Шиленко, сменив Н.И. Петрова. Таким образом, В. В. Терских отработал в БИОС-3 полный срок, а остальные трое – по четыре месяца.

Посев и уход за растениями, сбор урожая и выпечка хлеба занимали большую часть времени экипажа. Зато оранжерея Биос-3 давала в среднем в сутки 600 г зерна и примерно 1100 г свежих овощей.

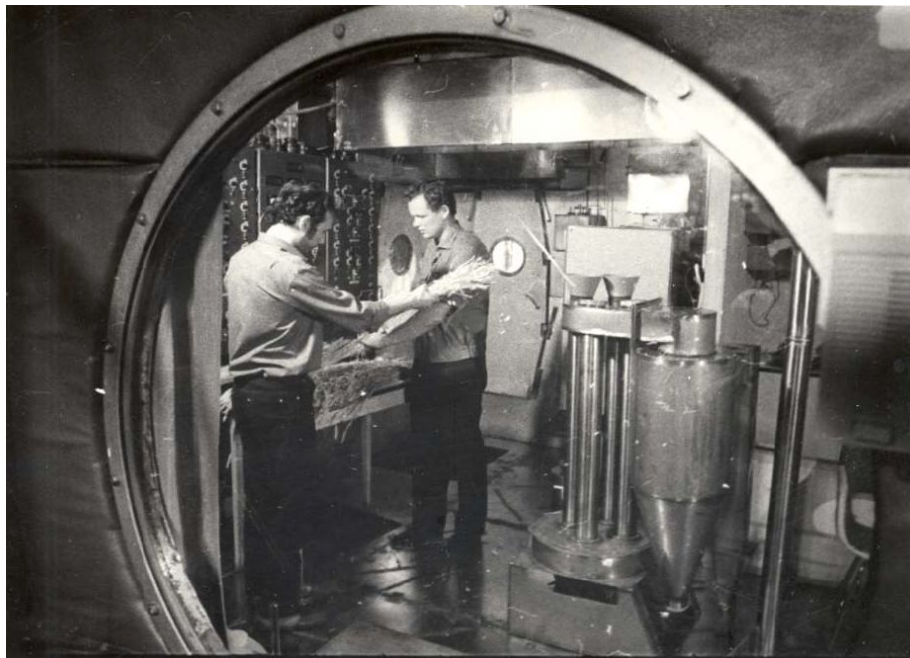
Суммарный показатель замкнутости круговорота веществ на первом этапе составил 82,4 %, а на втором и третьем – 91 %. Удалось достичь полного замыкания системы по кислороду и углекислому газу и почти полного (95 %) по воде. Экипаж получал 100 % необходимой растительной пищи (огурцы, редис, лук). В то же время овощи составляли лишь 20 % рациона по калорийности, давая 26 % углеводов, 14 % белков, около 3 % жиров и свежие витамины. Остальное приходилось на мясные продукты в виде обезвоженных консервов.



По массе пищи (критерий, существенный при использовании системы жизнеобеспечения в космическом полете) коэффициент замыкания был около 75 %. В ходе эксперимента отмечалось угнетение пшеницы на втором этапе из-за чрезмерного полива сточно-бытовой водой и овощных культур на третьем этапе из-за токсичного воздействия малых газовых примесей атмосферы.

Николай Бугреев участвовал и в двух последующих экспедициях и в общей сложности прожил в гермообъеме Биоса 13 месяцев. Зимой 1976–1977 гг. был осуществлен четырехмесячный эксперимент, в котором в течение первых 27 суток участвовали три бионавта, а затем двое (Н.И. Бугреев и Г. З. Асиньяров). На этот раз для жизнеобеспечения экипажа водоросли в ход не шли, а только пшеница, чуфа и овощные культуры. Бионавты использовали каталитическую печь для сжигания несъедобных частей растений, а также термкаталитический фильтр, который удалял из воздуха летучие органические примеси. Применение последнего позволило сохранить продуктивность высших растений в условиях замкнутой экосистемы. Воспроизводимая часть рациона экипажа была доведена до 52% по калорийности.





В ноябре 1983 г. – апреле 1984 г. состоялся последний, пятимесячный эксперимент (Н. И. Бугреев, С. С. Алексеев). Во всех трех опытах никакого ухудшения в состоянии здоровья бионавтов не отмечалось. Не было патологических изменений в микрофлоре кожных покровов и слизистых покровов в кишечнике, а также каких-либо аллергических явлений из-за контакта с растениями.

Опыт Биос-3 показал необходимость тщательного контроля баланса всех компонентов искусственной биосферы, включая микрофлору, и принципиальную возможность регулирования воспроизводства и замыкания экосистемы. Нерешенными оставались проблемы естественной утилизации несъедобной биомассы растений и возвращения в массообмен выводимой из организма человека соли.



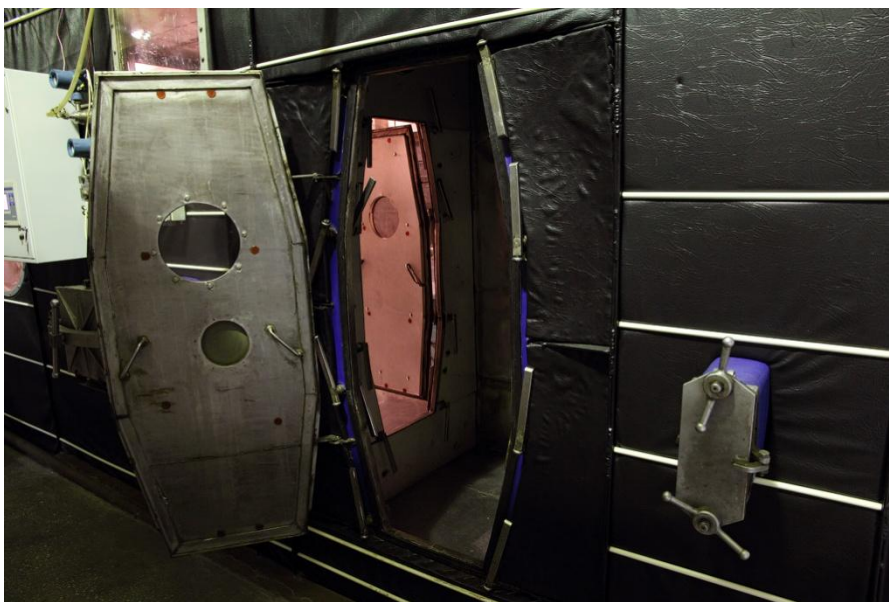
В конце 1980-х годов финансирование программы Биос практически прекратилось – и проект был заморожен. Для его спасения в 1992 г. был создан Международный центр замкнутых экологических систем, который возглавили академик И. И. Гительзон и исполнительный директор А.А. Тихомиров. В рамках Центра был разработан пакет технологий, позволяющих довести уровень замыкания до 90 % и выше.

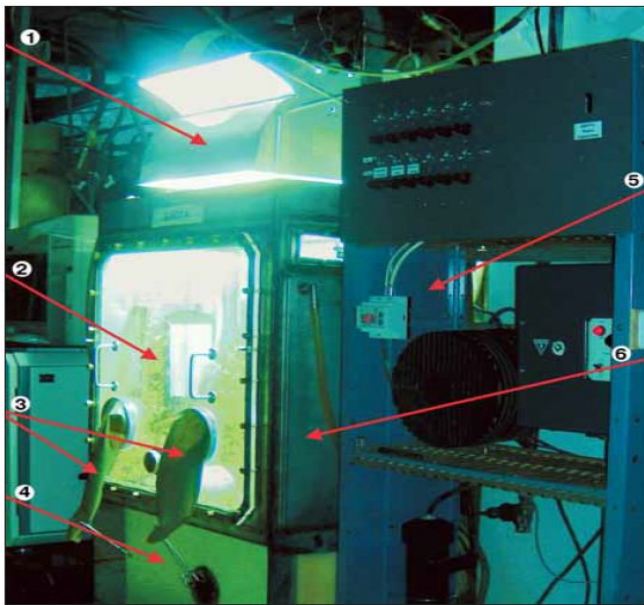


Центром проводились совместные работы с Европейским космическим агентством (проект BIOS-MHARS) и научными группами отдельных европейских стран. В 2012 – 2013 г. Биос-3 прошел модернизацию и работоспособен в настоящее время. Установка оборудована датчиками. Передающими информацию в локальную сеть института.

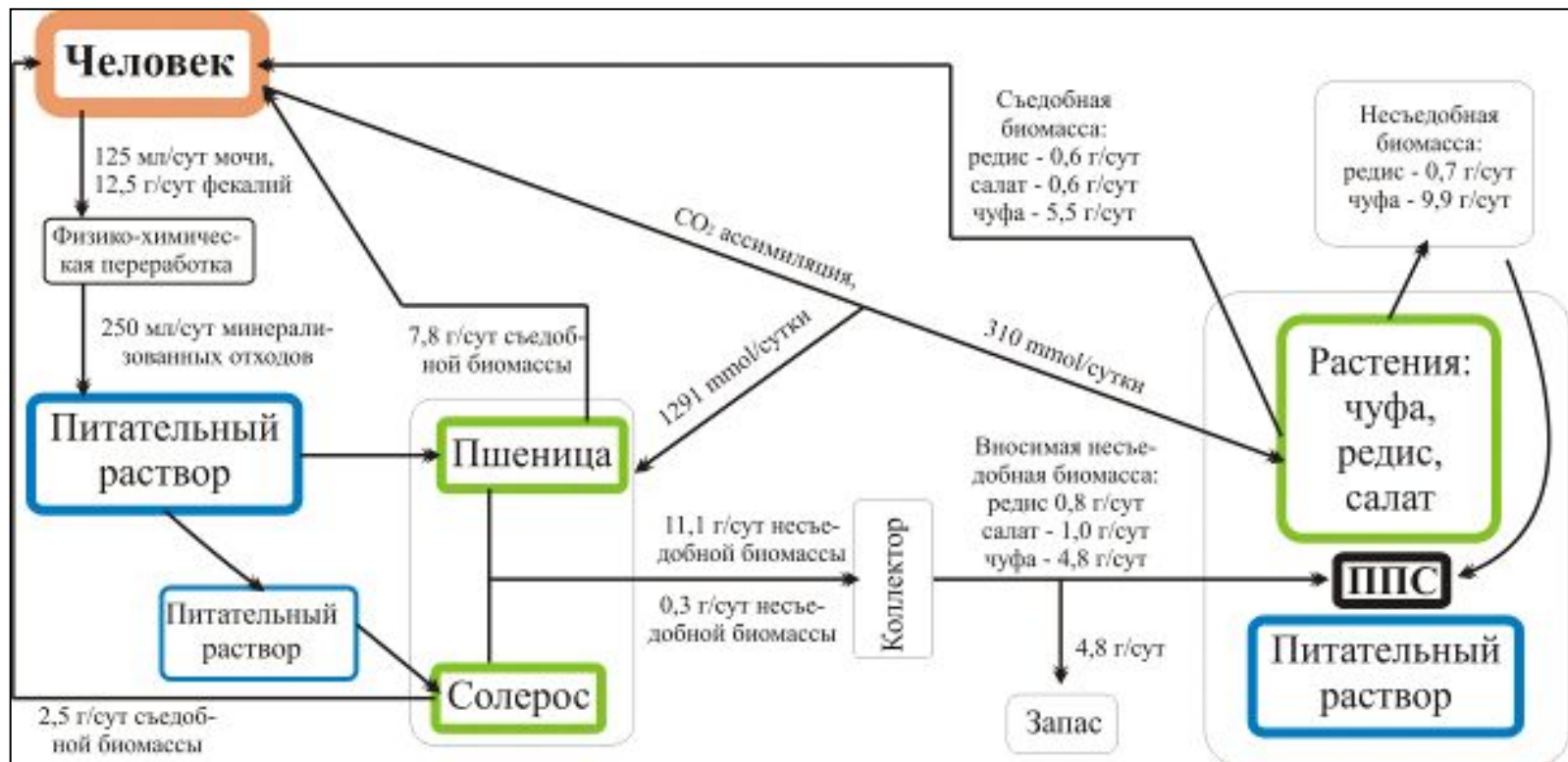
В конце ноября – начале декабря 2013 года по приглашению китайской стороны состоялся визит делегации ИБФ СО РАН в количестве шести человек во главе с директором ИБФ СО РАН академиком Дегерменджи А.Г. в Пекинский аэрокосмический университет, где развернуто строительство системы жизнеобеспечения. Целью визита являлось участие в работе международного совещания по замкнутым экосистемам и обсуждение возможностей широкомасштабного научного сотрудничества в области искусственных экологических систем.

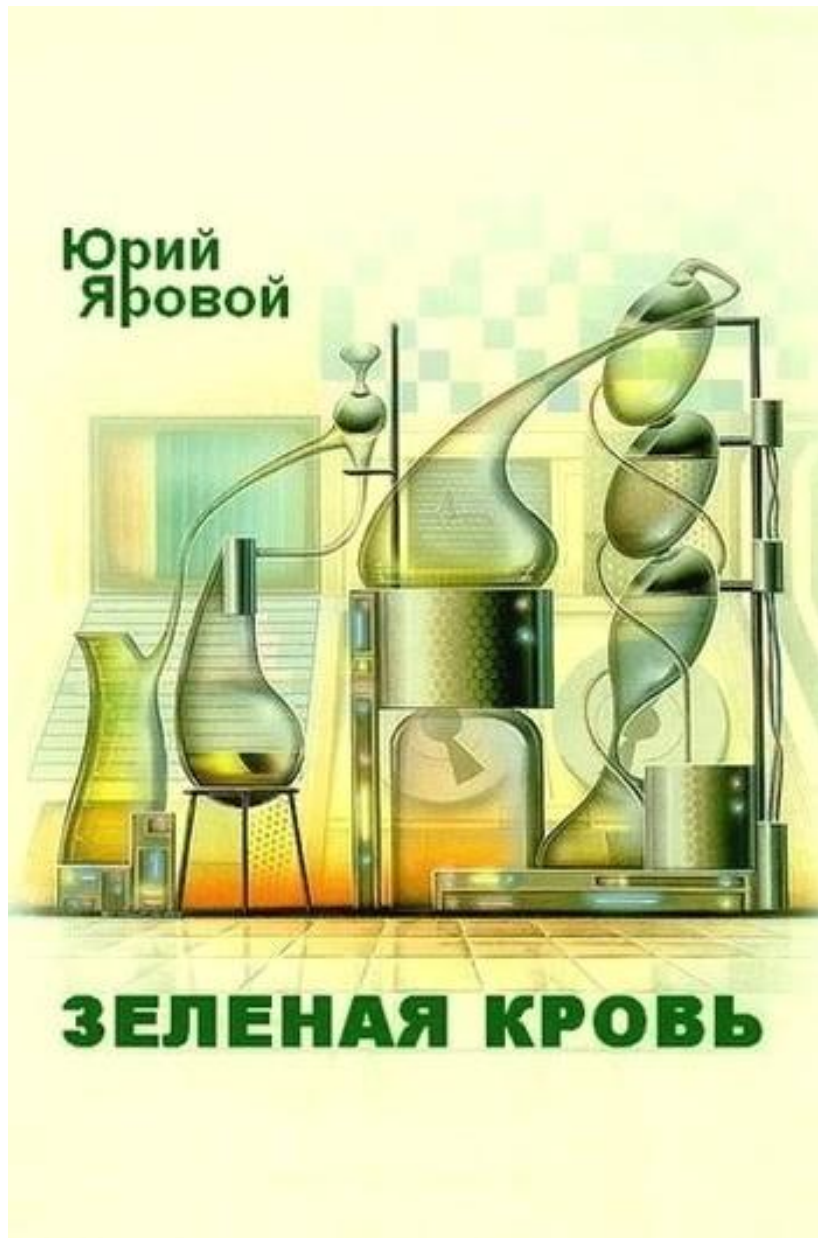
Для отработки технологий полного замыкания внутренних круговоротов вещества по химическим элементам. Создана модельная установка, имитирующая «присутствие 1/30 части человека». Была решена проблема утилизации твердых отходов и возвращения в пищу NaCl.





1. Высокоинтенсивный источник света;
2. Фототрофное звено из высших растений;
3. Манипуляторы для работы внутри герметичной камеры;
4. Бункер с **почвоподобным (!)** субстратом;
5. Приборная стойка контроля и автоматического поддержания параметров среды внутри гермокамеры;
6. Герметичная вегетационная камера с боковыми стенками из нержавеющей стали.





Эксперименту по программе
Биос посвящена повесть
Юрия Ярового
«Зелёная кровь», 1980 г.

Повесть начинается с
документального сообщения о
завершении 4-х месячного
эксперимента в установке «Биос-3»:

*«Известия», 27 мая 1977 г. "ЧЕЛОВЕК В
ИСКУССТВЕННОЙ БИОСФЕРЕ. ВАЖНЫЙ
НАУЧНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ УСПЕШНО
ЗАВЕРШЕН".*

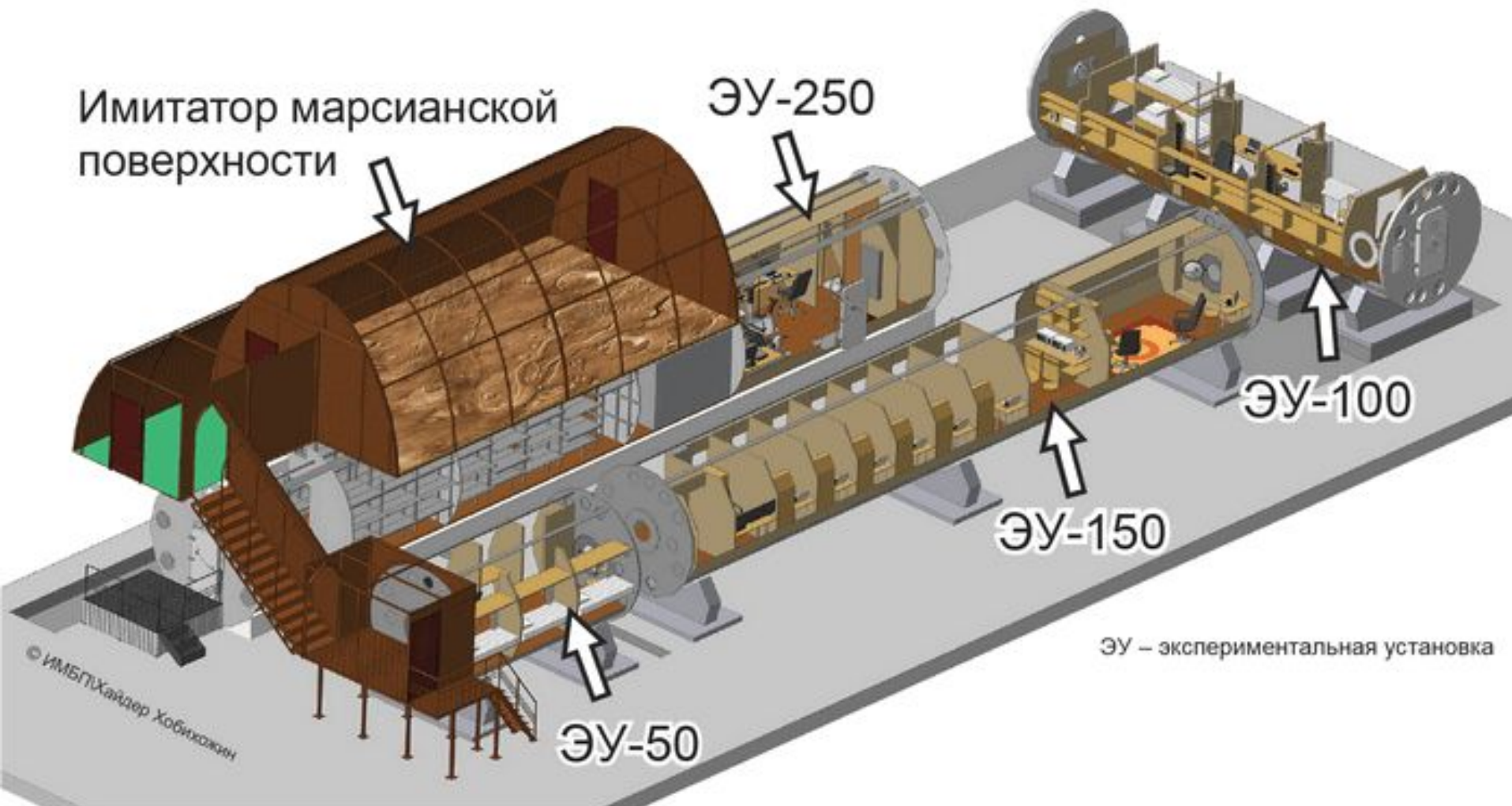
*Четыре месяца они жили и работали на своей
"планете". 120 суток они дышали, получали воду и
пищу за счет круговорота веществ в созданной
руками человека биосфере, управляя всеми
процессами жизнеобеспечения по заранее
намеченной программе...».*

Но, судя по описанию, действие происходит в
установке «Биос-2» в вымышленном Институте
экологии. В повести описан вымышленный
эксперимент, в ходе которого участник программы
попытался организовать симбиоз своего организма
с микроводорослями.

Фильм об эксперименте «Биос-3»: <https://youtu.be/9Liyt7dXngY>

Эксперимент «Марс-500»

Эксперимент проводился Государственным научным центром Российской Федерации – Институтом медико-биологических проблем РАН (г. Москва). Основой является длительная изоляция экипажа в условиях специально созданного наземного экспериментального комплекса. **Эксперимент по 520-суточной изоляции проводился с июня 2010 по ноябрь 2011 г.)**

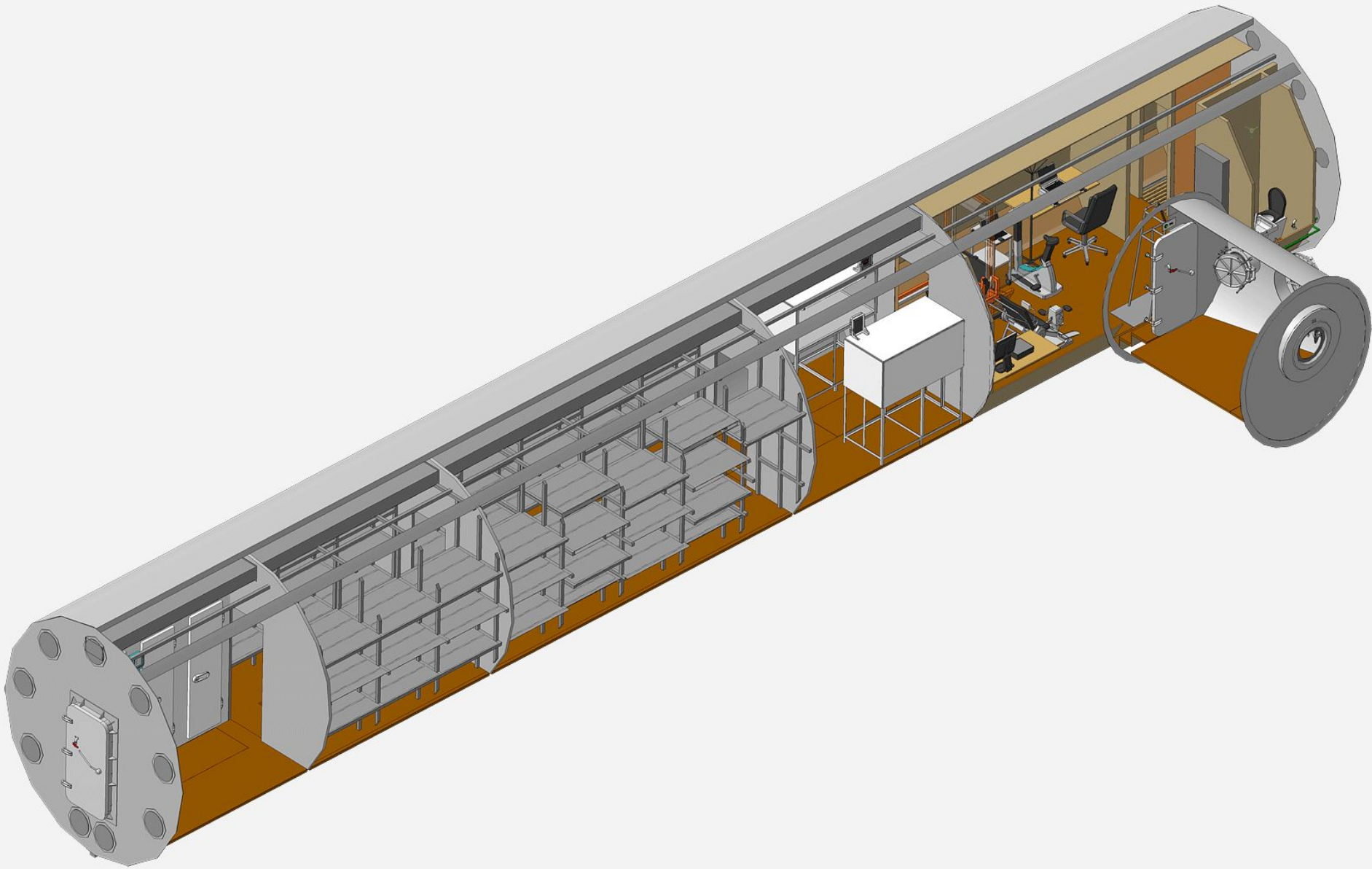


Оранжерея

В эксперименте участвовали шесть добровольцев из четырех стран мира: трое россиян, француз, итальянец и китаец.



В состав модуля ЭУ-250 медико-технического экспериментального комплекса проекта «Марс-500» входит оранжерея для выращивания растительных овощных культур.



Модуль ЭУ-250, с оранжереей общей посадочной площадью 14,7 м² и объемом 69 м³. Модуль включает: помещение оранжереи; холодильную камеру для хранения пищевых продуктов; стеллажи для продуктов, е требующих заморозки; тренажерный зал; системы обеспечения жизнедеятельности; шлюзовую камеру для удаления отходов.

Салатная машина (фитотрон, люминоста́т)



В экспериментальной оранжерее комплекса «Марс-500» был опробован способ конвейерного выращивания растений на цилиндрической посадочной поверхности с ориентированием побегов растений вдоль радиальных направлений за счёт реакции фототропизма.



В фитотроне со светодиодными светильниками, названном **«Салатная машина»** производилось выращивание конвейерного посева китайской капусты (*Brassica chinensis*).

«Лунный дворец» «Юэгу-1»



Наиболее «родственным» Биосу является китайская установка «Юэгу-1». Комплекс моделирования закрытой экологической системы обеспечения жизни на лунной базе «Юэгу-1» создан в Пекинском университете аэронавтики и астронавтики под руководством главного конструктора и научного руководителя, профессора Ли Хун. Создание китайского комплекса осуществлялось при активном участии красноярских и московских специалистов. С российской стороны в числе авторов были С.И. Барцев, А.Г. Дегерменджи, А.А. Тихомиров. С китайской стороны в группу Ли Хун входит в общей сложности 26 человек.

По проекту экспериментальная установка «Юэгу-1» общей площадью около 160 м² и объемом 500 м³ состоит из трех модулей полуцилиндрической формы:

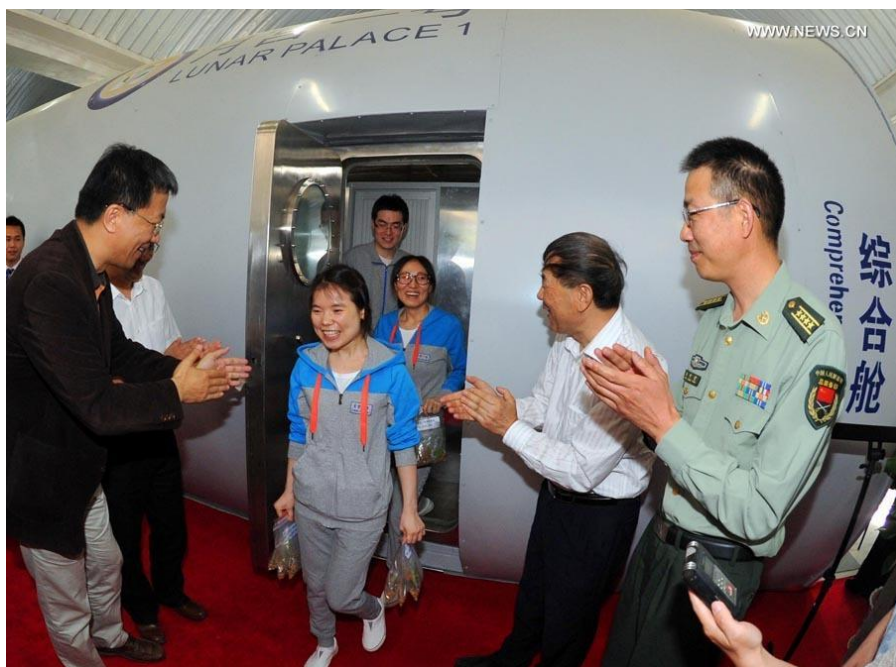
Интегрированный рабочий и жилой модуль длиной 14 м, шириной 3 м и высотой 2.5 м, имеющий в своем составе рабочую зону, кают-компанию, три каюты, помещение личной гигиены, блок переработки отходов и отсек для насекомых;

Два модуля оранжереи длиной 10 м, шириной 5 м и высотой 3,5 м, каждый из которых разделен на две изолированные секции.





Строительство установки первого этапа в Университете происходило с 1 марта по 8 октября 2013 г. В ее состав вошли интегрированный модуль площадью 42 м² и один модуль оранжереи площадью 58 м² с размещением растений в два яруса на общей площади 69 м². Объем установки первого этапа составлял около 300 м³. На втором этапе был введен в строй второй модуль оранжереи. Выращенные растения составляли 30-40% общей диеты, вода и воздух были замкнуты на 99%.



9 ноября 2013 г. закончилась приемка установки и ее оборудования. В течение двух месяцев, до 23 января 2014 г., продолжался этап подготовки установки к эксперименту – опробование систем, высадка растений. 23 – 30 января 2014 г. два студента провели пробную недельную «отсидку» в «Лунном дворце», а 3 февраля 2014 г. стартовал первый полномасштабный эксперимент. В нем участвовали трое добровольцев: командир экипажа и заместитель главного конструктора установки Се Бэйчжэнь, Дун Чэн и Ван Миньцзюань.

20 мая 2014 г. по окончании 105-суточного эксперимента первый экипаж вышел из изоляции в китайской наземной экспериментальной установке «Юэгун-1» («Лунный дворец»).