



## «Юэгун-1» – наследник проекта БИОС-3

П. Павельцев.  
«Новости космонавтики»

**20** мая по окончании 105-суточного эксперимента первый экипаж вышел из изоляции в китайской наземной экспериментальной установке «Юэгун-1» (月宫一号, буквально – «Лунный дворец»).

Комплекс моделирования закрытой экологической системы обеспечения жизни на лунной базе «Юэгун-1» создан в Пекинском университете аэронавтики и астронавтики (BUAA, «Бэйхан») в лаборатории экологии и систем жизнеобеспечения под руководством главного конструктора и научного руководителя профессора Лю Хун (刘红). Он характеризуется как первая в Китае и третья в мире замкнутая наземная интегрированная экспериментальная система биологического жизнеобеспечения, которая «имеет огромное значение для успешного осуществления планов по высадке на Луну, созданию лунной базы и зондированию Марса, обеспечения безопасности и качественной жизни космонавтов».

Следует подчеркнуть, что «Юэгун-1» принципиально отличается от наземного экспериментального комплекса в российском ИМБП (НК № 1, 2008; № 6 и № 9, 2009; № 1 и № 8, 2010; № 1, 2012), где основным

▼ «Экипаж» 105-суточного эксперимента: Дун Чэн, Ван Миньцзюань и Се Бэйчжэнь. Справа – руководитель проекта Лю Хун



направлением исследований стало изучение физиологии, работоспособности и поведения испытателей-операторов в условиях длительной, до 520 суток, изоляции. Главной задачей китайского комплекса является создание замкнутой биорегенеративной системы жизнеобеспечения.

Близким аналогом и фактическим предшественником китайской установки является экспериментальный комплекс БИОС-3 Института биофизики Сибирского отделения РАН в Красноярске, введенный в строй в 1971 г. и послуживший основой обширной серии экспериментов.

В 1991–1994 гг. в США на частные средства проводился крупномасштабный эксперимент «Биосфера-2» с экспериментальным объемом из семи модулей суммарной площадью около 15 000 м<sup>2</sup>. Постановщики попытались создать экосистему, приближенную к реальной земной как по геоклиматическому, так и по видовому разнообразию (свыше 3800 видов растений и животных). Два экипажа прожили в установке два года и шесть месяцев, однако условия изоляции не соблюдались, а биосфера за время нахождения в ней испытываемых претерпела значительную деградацию (НК № 4 и № 20, 1993; № 19, 1994).

Руководитель китайского эксперимента Лю Хун в 1987 г. окончила Нанкинский университет по специальности «экология», а в июне 1994 г. в Московском государственном университете защитила диссертацию кандидата географических наук в области экологии («Изменение природных условий региона Аральского моря в условиях антропогенной нагрузки»). После возвращения в Китай она преподавала в ряде университетов, а с 2004 г. занимается биорегенеративными системами жизнеобеспечения, будучи профессором факультета

биоинженерии Университета Бэйхан и начальником лаборатории экологии и систем жизнеобеспечения. Лю Хун активно привлекает к совместным работам молодых российских исследователей.

Проект китайской установки «Юэгун-1» по своей идеологии является почти полной копией БИОС-3 с поправкой на современные технологии. Поэтому опишем сначала историю красноярского проекта БИОС, оставшуюся практически неизвестной за пределами профессионального сообщества, в отличие от экспериментов по изоляции в ИМБП, в наземном лабораторном комплексе («Год в земном звездолете», 1967–1968) и наземном экспериментальном комплексе (с 1971 г.), которые освещались исключительно широко.

### БИОС-3 – сибирская попытка замыкания СЖО

Родоначальниками БИОС стали Сергей Павлович Королёв и Леонид Васильевич Киренский, создатель и директор Института физики Сибирского отделения АН СССР. Они встретились и познакомились как депутаты Верховного Совета СССР, и в 1961 г. по заданию С. П. Королёва в отделении биофизики, возглавляемом профессором Иваном Александровичем Терсковым\*, с экспериментов по культивированию одноклеточной водоросли хлореллы были начаты работы по созданию замкнутой СЖО для перспективных лунных и планетных баз.

Экспериментальная установка БИОС-1 появилась в 1964 г. В сущности она представляла собой культиватор с водорослями, соединенный воздуховодом с гермокабиной объемом 12 м<sup>3</sup>. Всего 18 литров культуры *Chlorella vulgaris*\*\* , растущей на площади 8 м<sup>2</sup> при искусственном освещении тремя шестикилловаттными 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 от 12 часов до 30 суток. Позднее был замкнут и водообмен, что позволило провести 45-суточный опыт. Увы, приучить экспериментаторов есть хлореллу не удалось, а кроме того, водорослям не хватало некоторых биогенных элементов.

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 размером 2.0×2.5×1.7 м<sup>3</sup>. В нем размещались высшие растения – сначала овощные культуры, а затем и пшеница, – рассматриваемые как средство регенерации атмосферы и источник пищи. Водоросли обеспечивали восстановление воздушной среды примерно на 72%, а высшие растения – на 28%. К 1968 г. состоялись эксперименты с экипажем из двух человек продолжительностью 30 и 73 суток,

\* В 1981 г. отделение было преобразовано в самостоятельный Институт биофизики, который академик И. А. Терсков возглавлял до 1984 г.

\*\* В реальности это была не чистая культура хлореллы, а так называемый альгобактериальный ценоз.



▲ Николай Бугреев ухаживает за растениями

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.

Эксперименты на БИОС-2 продолжались до 1970 г. и послужили основой для ввода в строй в начале 1972 г. полномасштабной установки БИОС-3 с целью получения замкнутой экологической системы жизнеобеспечения человека с автономным управлением. В создании БИОС-3 активно участвовали первый руководитель проекта и заведующий лабораторией фотобиологии профессор Иосиф Исаевич Гительзон и его сотрудники, в особенности – главный конструктор всех трех установок Борис Григорьевич Ковров и Генрих Михайлович Лисовский, который отвечал за биосистему интенсивного культивирования растений.

Установка БИОС-3 представляла собой полноценный экспериментальный комплекс стоимостью около 1 млн рублей и была рассчитана на пребывание в течение года до шести испытуемых. Фактически в ней прошли три длительных эксперимента с экипажами численностью два и три человека.

Комплекс БИОС-3 построили в подвале корпуса отделения биофизики. Герметичное помещение со стенами из нержавеющей стали имело размеры 14х9х2.5 м и объем около 315 м<sup>3</sup>. Оно было разделено на четыре равных по площади отсека: один жилой и три регенеративных, причем в двух монтировались фитотроны с высшими растениями, а в третьем – культиваторы с микроводорослями. 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.

Отсеки-фитотроны имели суммарный объем 150 м<sup>3</sup> при посевной площади 40.8 м<sup>2</sup>. Каждый из них освещался 20 дугowymi 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<sup>2</sup>) и овощные культуры: соя, салат,

морковь, редис, репа, свекла, картофель, огурцы, щавель, капуста, укроп и лук. Пшеница сорта 232 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 шести возрастов. Каждый из трех культиваторов хлореллы площадью светопримной поверхности 10 м<sup>2</sup> 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. Конденсат испаренной влаги из отсеков с фитотронами проходил кипячение и дополнительно перерабатывался на ионообменных смолах и активиро-



▲ Обед экипажа: М.П. Шиленко, В.В. Терских и Н.И. Петров

ванном угле до состояния, пригодного для питья. От микробного культиватора отказались, 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 хлореллы 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. Его начинали агроном Мария Петровна Шиленко, инженер Владислав Владимирович

Терских и врач Николай Иванович Петров. В феврале агронома заменил инженер-механик и технолог по культивированию водорослей Николай Иванович Бугреев, а в апреле 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\*\*. Часть зерна отбиралась на семена для посева и на анализы, а из оставшегося выпекали хлеб.

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 квазизамкнутой СЖО 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 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 термокаталитиче-

▼ Николай Петров с урожаем пшеницы



\* Впоследствии отсек с культиваторами был также переоборудован под растения, что увеличило посевную площадь до 63 м<sup>2</sup>. В число культур была добавлена чуфа, клубеньки которой содержат растительное масло.

\*\* В годовом эксперименте ИМБП также имелась оранжерея посевной площадью 7.5 м<sup>2</sup>, в которой выращивались капуста хибинская, кресс-салат, огуречная трава и укроп. Оранжерея обеспечивала съем витаминной зелени в количестве 600 г в сутки.

ский 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 биомассы растений и возвращения во внутрисистемный массообмен выводимой из организма человека соли.

В конце 1980-х годов финансирование БИОС практически прекратилось – и проект был заморожен. Для его спасения в 1992 г. был создан Международный центр замкнутых экологических систем, который возглавили И. И. Гительзон и исполнительный директор Александр Аполлинарьевич Тихомиров. В рамках Центра был разработан пакет технологий, позволяющих довести уровень замыкания до 90% и выше. Проводились совместные работы с Европейским космическим агентством (проект BIOSMARS) и научными группами отдельных европейских стран. К сожалению, попытки добиться выделения бюджетных средств на модернизацию экспериментального комплекса и возобновления натуральных экспериментов пока не принесли успеха.

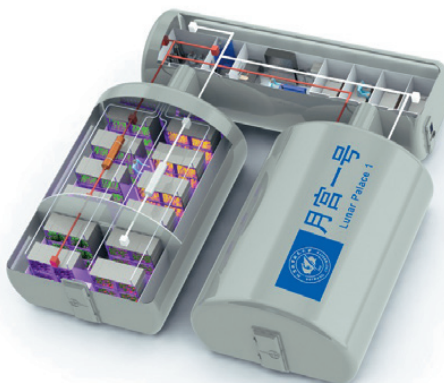
### Лунный дворец «Юэгун-1»

Создание китайского комплекса осуществлялось при активном участии красноярских и московских специалистов. Процесс передачи опыта был задокументирован серией совместных статей 2008–2013 гг. по элементам замкнутых СЖО. С российской стороны в числе авторов были С. И. Барцев, Ю. А. Беркович, Ю. Л. Гуревич, А. Г. Дегерменджи, А. Н. Ерохин, В. С. Ковалёв, В. А. Козлов, Н. С. Мануковский, Е. В. Нестеренко, В. И. Полонский, С. В. Хижняк. С китайской стороны в группу Ли Хун входит в общей сложности 26 человек.

По проекту экспериментальная установка «Юэгун-1» общей площадью около 160 м<sup>2</sup> и объемом 500 м<sup>3</sup> 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.



▲ Комплекс «Юэгун-1» в полной конфигурации. На первом этапе построены два модуля, показанные в разрезе

Строительство установки первого этапа в Университете Бэйхан происходило с 1 марта по 8 октября 2013 г. В ее состав вошли интегрированный модуль площадью 42 м<sup>2</sup> и один модуль оранжереи площадью 58 м<sup>2</sup> с размещением растений в два яруса на общей площади 69 м<sup>2</sup>. Объем установки первого этапа составляет около 300 м<sup>3</sup>. (На втором этапе предполагается ввести в строй второй модуль оранжереи.)

19 ноября закончилась приемка установки и ее оборудования. К этому моменту была приурочена научная конференция, состоявшаяся в Бэйхане 2–4 декабря. На нее были приглашены российские участники эксперимента БИОС-3 и дальних совместных работ, а также причастные к американскому эксперименту «Биосфера-2». 29 ноября готовую установку «Юэгун-1» осмотрели директор Института биофизики академик Андрей Дегерменджи, заведующие лабораториями Анатолий Тихомиров и Сергей Барцев, старшие научные сотрудники Николай Мануковский и Софья Ушакова. Два дня спустя гостями комплекса были Марк Нелсон (Mark Nelson), Уильям Демпстер (William Dempster) и Ральф Анкен (Ralf Anken).

В течение двух месяцев, до 23 января, продолжался этап подготовки установки к эксперименту – опробование систем, высадка растений. 23–30 января 2014 г. два студента Лю Хун провели пробную недельную «отсидку» в «Лунном дворце», а 3 февраля стартовал первый полномасштабный эксперимент. В нем участвовали трое добровольцев: командир экипажа и заместитель главного конструктора установки Се Бэйчжэнь (谢倍珍), Дун Чэн (董琛) и Ван Миньцзюань (王敏娟).

Как и в российском прототипе, трофическая (пищевая) цепочка строилась из

высших растений (автотрофы), животных и почвенных редуцентов. В первом эксперименте растительность была представлена пятью видами злаков (пшеница, соя, арахис, чуфа, кукуруза), 15 видами овощей (морковь, бобы, капуста, несколько разновидностей лука, портулак, амарант и др.) и одним видом ягод (клубника). Три члена экипажа съедали до 1 кг овощей в день. Мучным червям – личинкам мучного хрущача *Tenebrio molitor* – скармливали несъедобные части растений, а сами они, будучи традиционным для Китая видом еды, шли в пищу, частично обеспечивая людей животным белком. Растительное масло, животная пища и еще некоторые компоненты поступали снаружи по специальному каналу; в обратном направлении добровольцы передавали образцы воды и микробиологические пробы.

Экипаж комплекса имел возможность независимого регулирования параметров внутренней среды в каждом отсеке. В модуле оранжереи было организовано светодиодное освещение в красном участке спектра, оптимальное для фотосинтеза. Растения поглощали углекислый газ и выделяли кислород, который шел на дыхание людей и участвовал в переработке (биоферментации) остатков пищи и отходов жизнедеятельности человека для последующего внесения их в грунт. Конденсат атмосферной влаги после очистки обогащался микроэлементами и поступал в баки питьевой воды. Остаток очищенной воды и урина шли на полив.

Обязанности участников эксперимента были распределены в соответствии с их научными интересами. Се Бэйчжэнь отвечала за работу аппаратуры водного цикла, переработку твердых отходов, культивацию растений и кормление червей. Ван Миньцзюань занималась посадкой овощей и исследованиями на соевых бобах, а также исполняла обязанности по выпечке хлеба и приготовлению пищи. Дун Чэн, помимо опытов с пшеницей, вел контроль физиологического состояния и брал пробы. По окончании эксперимента он признался, что в какой-то момент хотел прервать «отсидку», но чувство долга и дисциплина взяли верх.

Три члена первого экипажа «Юэгун-1» провели в герметично закрытом объеме комплекса 105 дней и покинули его 20 мая, забрав с собой пакеты с семенами нового урожая. Их встретили президент университета Хуай Цзиньпэн, руководитель эксперимента Лю Хун, другие специалисты и ученые, а также представители космической отрасли: заместитель директора первого департамента Государственного управления оборонной науки, техники и промышленности Ли Гопин и директор управления качества и оперативного управления Канцелярии пилотируемой космической программы Фэн Чжунтан.

По результатам первого эксперимента команда Лю Хун отчиталась о полном замыкании СЖО по кислороду и воде и на 55% по пище; общий показатель замкнутости оценен в 97%. С вводом в строй второго модуля оранжереи постановщики рассчитывают получать до 80% необходимой экипажу пищи.



▲ Лю Хун демонстрирует готовую к эксперименту установку делегации Института биофизики Сибирского отделения РАН