



Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр»

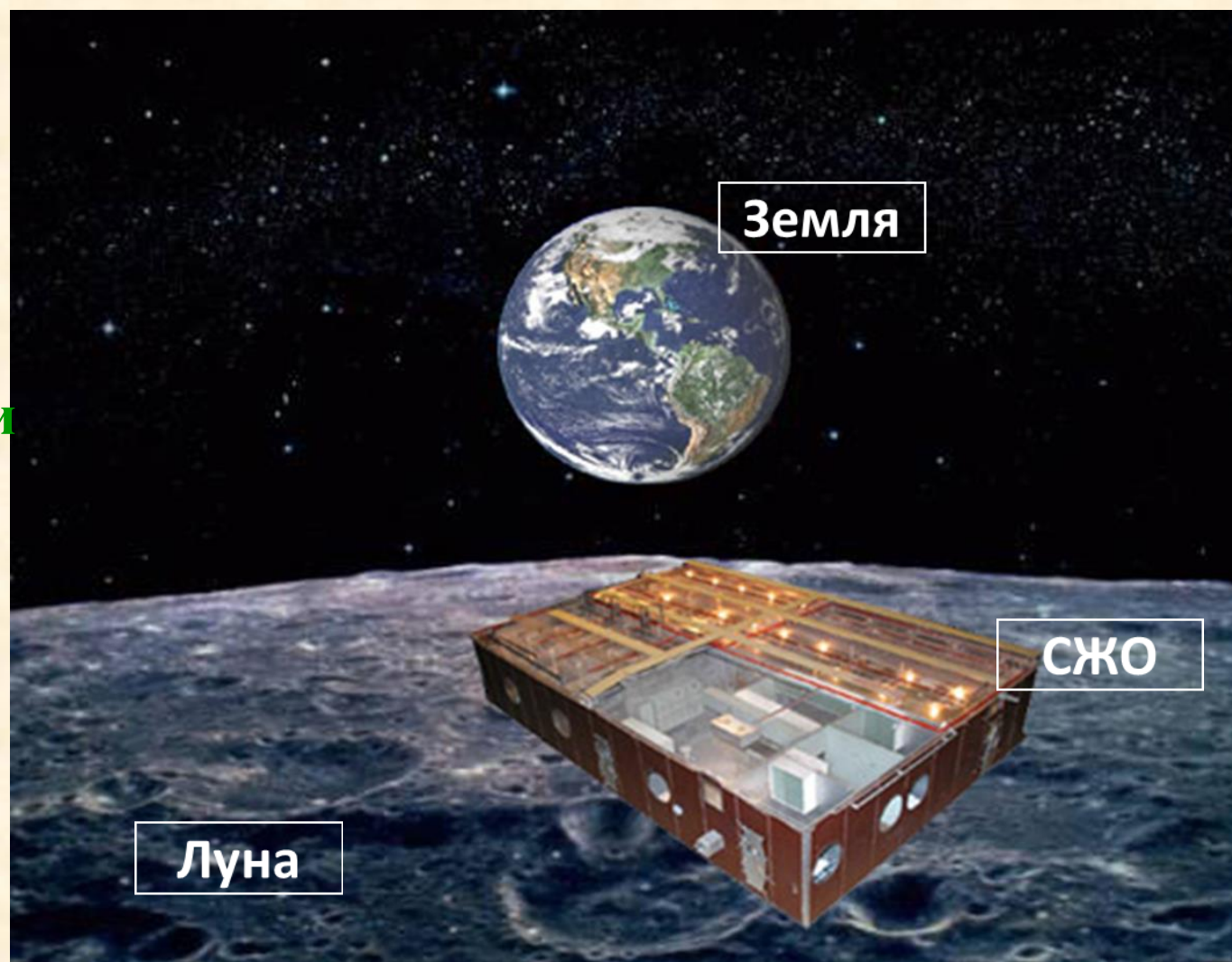
Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ КНЦ СО РАН), Институт биофизики



БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

Академики
И.И. Гительзон
А.Г. Дегерменджи

Общее собрание
СОРАН
7 ноября 2018



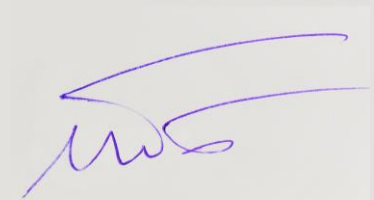
Дорогие коллеги,

Мои медицинские обстоятельства препятствуют моему участию в нашем Собрании.

- Цель нашего доклада – привлечь внимание академического сообщества Сибири к тому, что Красноярский Центр располагает уникальным, пока единственным в мире экспериментальным комплексом БИОС для длительного жизнеобеспечения людей в замкнутой и автономной экосистеме.**
- Разработанная модель управления биосинтезом позволяет оптимизировать условия жизни людей в космических и земных условиях при минимизации энергетических и материальных затрат.**
- Общечеловеческое значение этой задачи позволит восстановить работу Международного Центра Замкнутых Экосистем в КНЦ.**
- Этот «мегасаенс проект» рожден и развит в СОРАН, благодаря мощной стартовой поддержке академиков М.А. Лаврентьева и С.П. Королева.**

С надеждой на стратегическую помощь Сибирского отделения и в сегодняшних столь трудных для науки условиях.

Ваш акад. Гительзон





THE MARTIAN



Введение

- Освоение Солнечной системы является приоритетной задачей государственной политики в области космонавтики на длительную перспективу.
- К числу первоочередных космических тел для освоения отнесены: астероиды, Луна, Марс, Венера, системы Юпитера и Сатурна, то есть не только ближний, но и средний, а также дальний космос.

Типы искусственных СЖО

1. **Системы СЖО на запасах:** существуют до истощения запасов, не способны к производству нужных человеку веществ.
2. **Физико-химические СЖО** воспроизводят до 100% кислорода и воды, поглощают CO_2 (пример – МКС). Пищу **НЕ** создают в принципе!
3. **Биолого-технические СЖО** также воспроизводят до 100% кислорода и воды, поглощают CO_2 , но и воспроизводят растительную пищу!

Начало научных исследований биологических искусственных экосистем в России (СССР)

- Цель - создание системы для длительного пребывания человека в космическом пространстве в условиях земной комфортности.
- Задача была поставлена ак. С.П. Королевым в 60-х годах XX века — создать действующую модель автономной Биологической СЖО и провести длительные тестовые эксперименты с экипажем.

Красноярские ученые – инициаторы создания БСЖО, включающей человека



Академики:

КИРЕНСКИЙ Леонид Васильевич – директор ИФ СО АН СССР (1956-1969);

ТЕРСКОВ Иван Александрович – первый директор ИБФ СО РАН (1969-1983)

ГИТЕЛЬЗОН Иосиф Исаевич - директор ИБФ СО РАН (1984-1996)

Замкнутость и биосфера

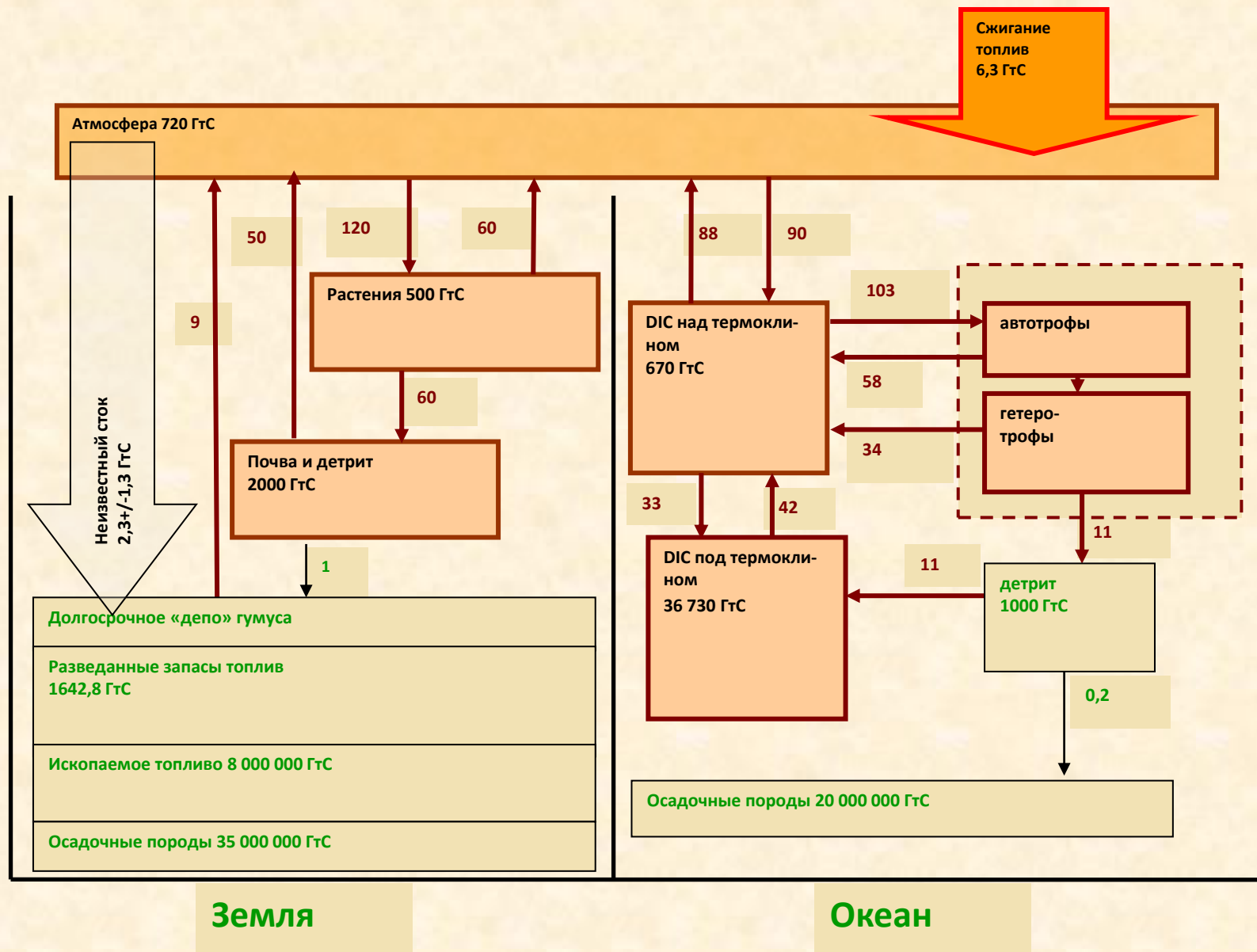
- В соответствии с идеями ак. В.И. Вернадского жизнь в земной биосфере как в термодинамически закрытой системе может существовать только вследствие высокой замкнутости циклических превращений веществ, осуществляемых всеми живыми организмами за счет энергии Солнца.

- Все, что производит какой-либо организм, в том числе и он сам, потребляется другими организмами и возвращается в цикл.

- Одни и те же атомы химических элементов используются живыми организмами многократно.

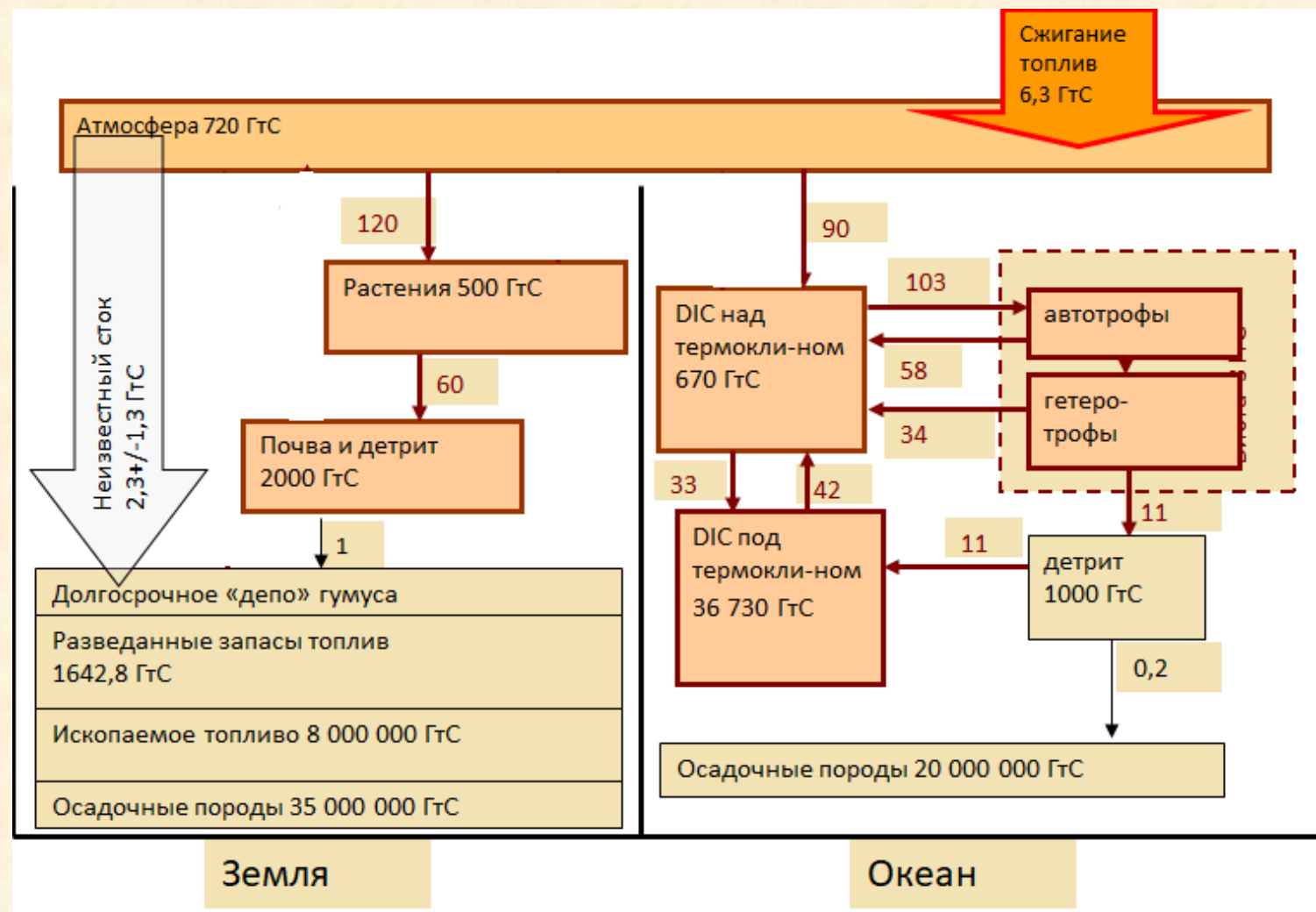
- Теоретические и экспериментальные модели экосистем должны быть, прежде всего, высокозамкнутыми по потокам веществ.

ГЛОБАЛЬНАЯ ДИНАМИКА УГЛЕРОДА В БИОСФЕРЕ ЗЕМЛИ



Замкнутость 100%.

ГЛОБАЛЬНАЯ ДИНАМИКА УГЛЕРОДА В БИОСФЕРЕ ЗЕМЛИ



Без замкнутости время жизни Биосферы: $720/210=3-4$ года

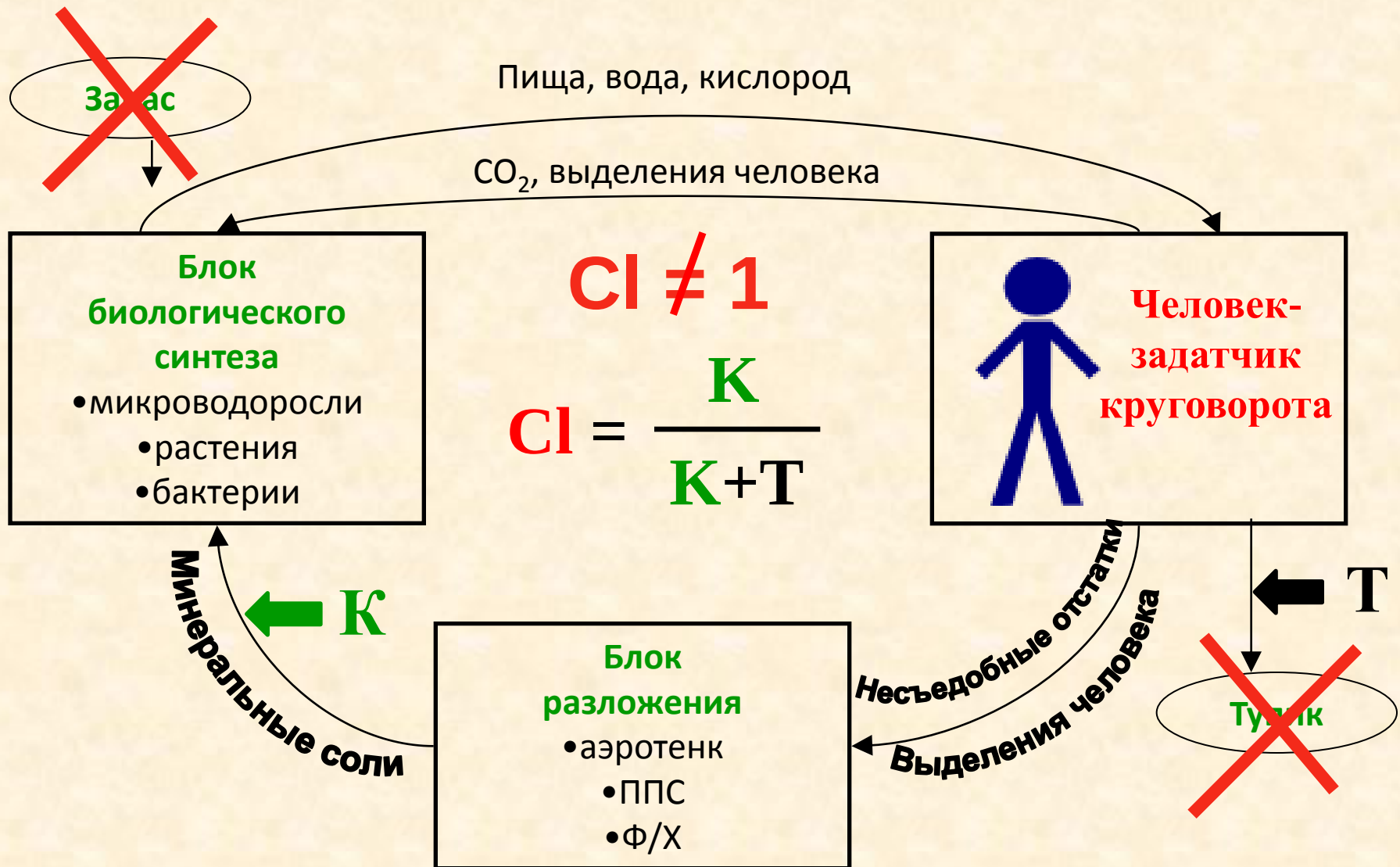
Экологические механизмы замыкания

(на малых временах)

Предполагается, что видовой состав, параметры видов (стехиометрия: соотношение элементов O-6:C-2:H-1:...), список выделяемых и поглощаемых веществ и соответствующие скорости процессов утилизации и окисления **строго заданы и согласованы между собой** естественным (через лимитирование) или/и искусственным образом (физико-химически). Это **«жесткое» замыкание.**

- **«Мягкое» замыкание.**
- **«Сетевое» замыкание.**

Схема «жесткой» циркуляции веществ в СЖО



СТЕПЕНЬ ЗАМКНУТОСТИ В РАВНОВЕСИИ

Коэффициент
замкнутости:

$$CI = 1 - \frac{T}{K+T} = K/(K+T)$$

Запас

=T

T=14 т/год

T=6 т/год

T=0.5 т/год

T=0.2 т/год

T=0.1 т/год

CI=0

CI=0.57

CI=0.96

CI=0.986

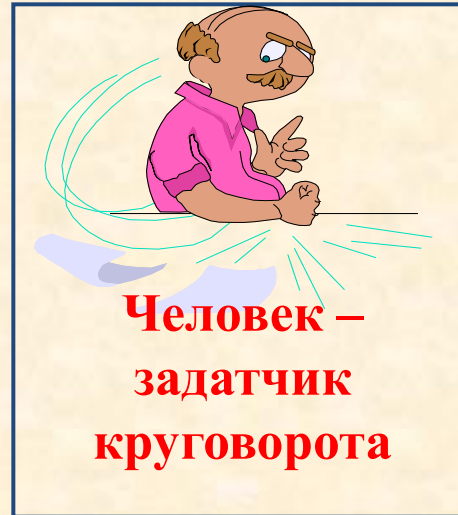
CI=0.99

Круговорот

Пища

Вода

Воздух



Человек –
задатчик
круговорота

Ежесуточное потребление
(K+T):

~23 кг воздуха;

~0.83 кг O₂;

~0.56 кг пищи (сухой);

~15 кг воды.

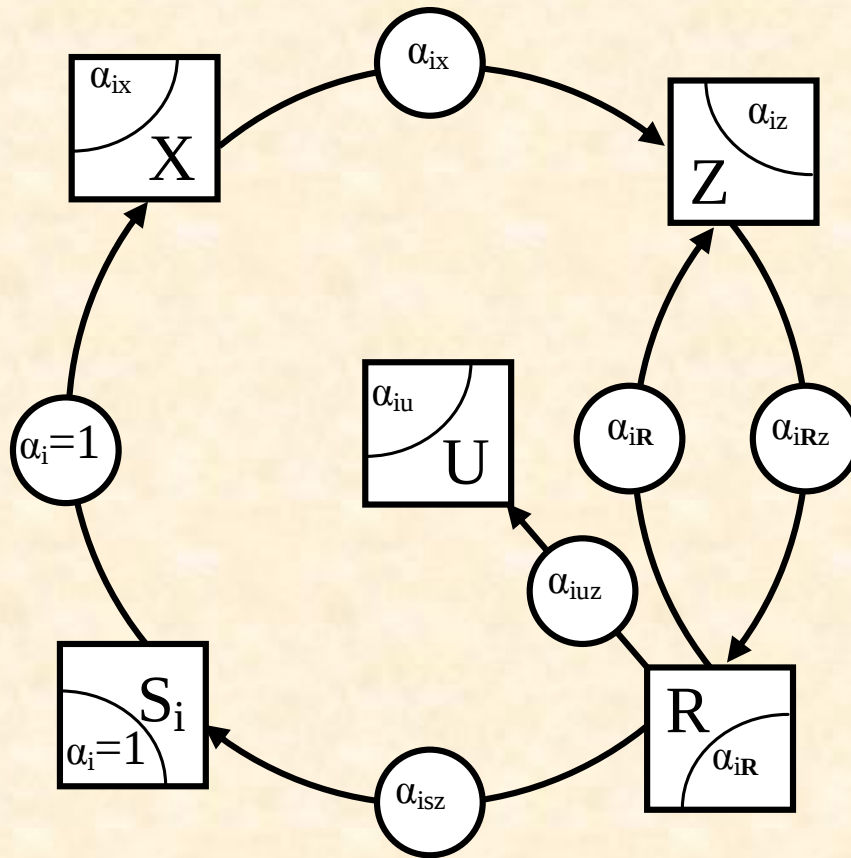
Итого: ~39 кг/сут или 14 т/год

=T

Отходы
(тупик)

Удаление CO₂

Упрощенная схема биологического круговорота веществ



$$\dot{X} = \mu_X X - \gamma_X X,$$

$$\dot{R} = \mu_R R - \gamma_R R,$$

$$\dot{Z} = \gamma_X X + \gamma_R R - \frac{\mu_R}{Y_{RZ}} R,$$

$$\dot{S}_i = -\frac{\mu_X X}{Y_{Xi}} + \alpha_{iSZ} \phi \mu_R R,$$

$$\dot{U} = \mu_R R \left(\frac{1}{Y_{RZ}} - 1 - \phi \right),$$

or

$$\dot{U}_i = \mu_R R \left(\frac{\alpha_{iZ}}{Y_{RZ}} - \alpha_{iRZ} - \alpha_{iSZ} \phi \right),$$

X – автотроф, R – редуцент, Z – мертвая органика, U – тупик, S_i – i^{th} биоген, μ – скорость роста, γ – смертность, Y – урожайность, α_{iA} – доля $i^{\text{го}}$ биогена в веществе или потоке, ϕ – минерализация: количество минерализованной органики на единицу скорости роста.

МЕХАНИЗМ «ЖЕСТКОГО» ЗАМЫКАНИЯ

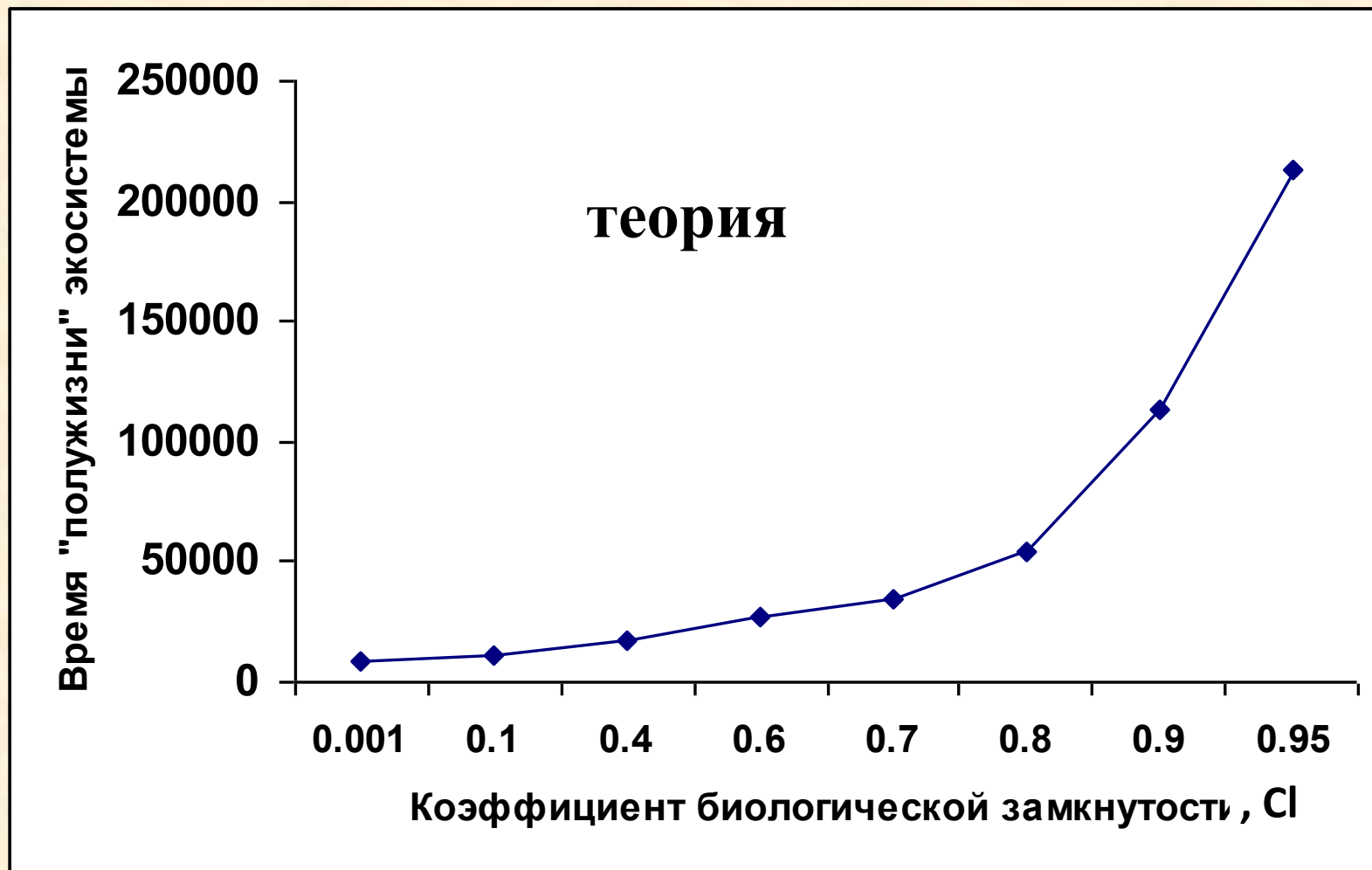
**Условия «замкнутости»
круговорота по i-му элементу:**

$$\frac{\alpha_{iz}}{Y_{RZ}} = \alpha_{iRZ} + \alpha_{iSZ}\varphi$$

и по веществу в целом:

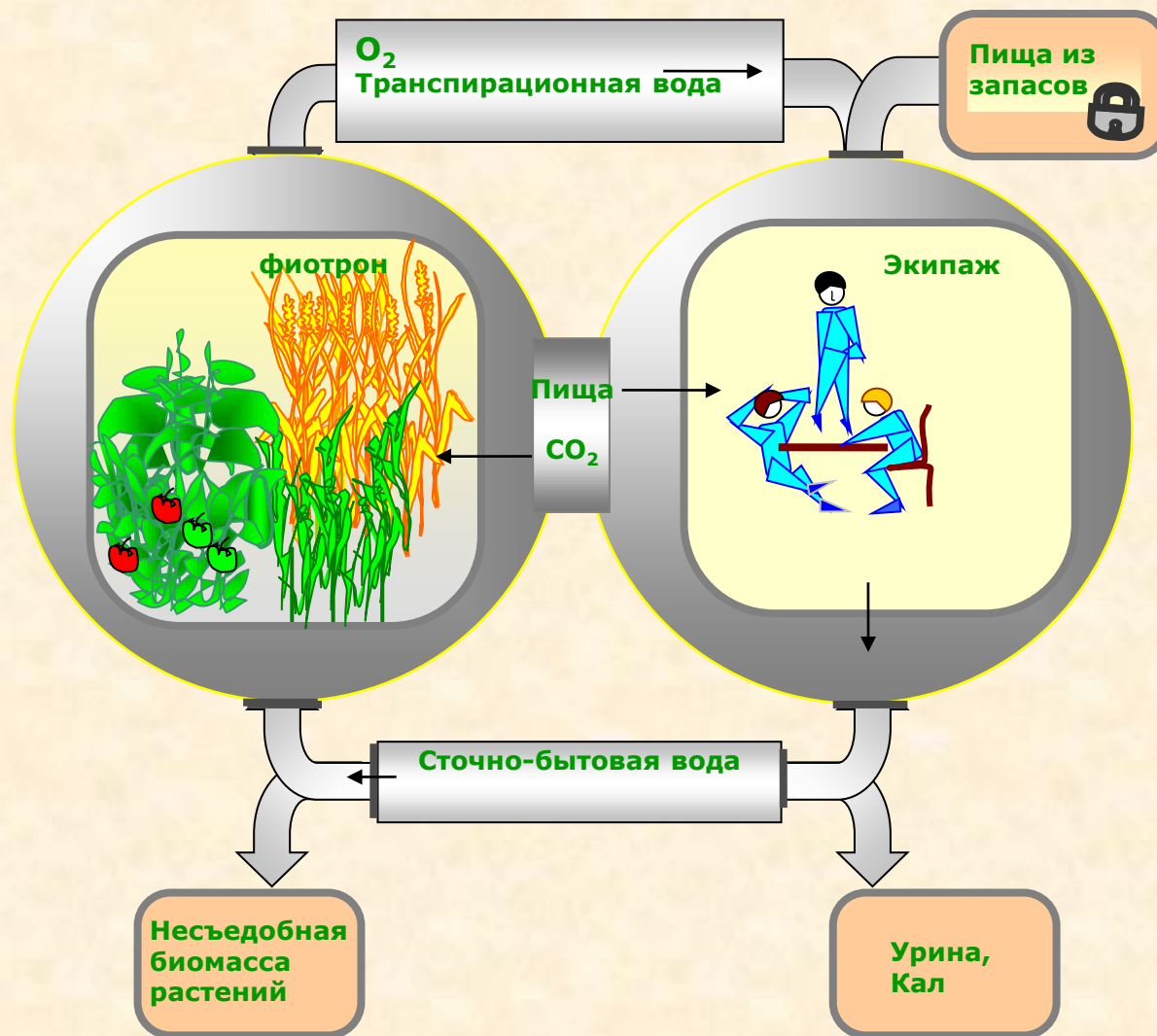
$$\frac{1}{Y_{RZ}} = 1 + \varphi$$

Зависимость времени «полужизни» частично замкнутой экосистемы от коэффициента биологической замкнутости (CI)



Даты	Установка	Длительность эксперимента, сутки	Число членов экипажа	Рабочий объем	Звено-регенератор	Биологическая регенерация компонентов среды, % регенерации для экипажа
1964	«БИОС-1»,	1	1	12 м³	водоросли	CO ₂ - 100%
1965	«БИОС-1»,	5	1	12 м³	водоросли	-«-
1965	«БИОС-1»,	14	1	12 м³	водоросли	-«-
1965	«БИОС-1»,	30	1	12м³	водоросли	-«-
1966	«БИОС-1»,	45	1	12 м³	водоросли	O ₂ - 100%, H ₂ O- 100%,
1968	«БИОС-2»	90	1	20.5 м³	водоросли, высшие растения, запас воздуха	O ₂ - 100%, H ₂ O- 100%, пища - 4% (хлеб)
1969 1970	«БИОС-2»	30	1	20.5 м³	водоросли, высшие растения (пшеница)	O ₂ - 100%, H ₂ O- 100%, пища- 7% (хлеб)
1969 1970	«БИОС-2»	30	1	20.5 м³	водоросли, высшие растения (овощи)	O ₂ - 100%, H ₂ O- 100%, пища - 8.2 % (овощи)
1972 1973	«БИОС-3»	180	3	237 м³	Высшие растения, высшие растения+водоросли	O ₂ - 100%, H ₂ O- 100%, пища - 12-30% (хлеб, овощи)
1977	««БИОС-3»	120	3 и 2	237 м³	Высшие растения, сжигание растительных отходов	O ₂ - 100%, H ₂ O- 100%, пища - 48% (растения - 61%)
1983- 1984	«БИОС-3	120	2	315 м³	Высшие растения, сжигание растительных отходов	O ₂ - 100%, H ₂ O- 100%, пища- 77.5%

Использование биологических методов в БСЖО



Человеку необходимы:

- кислород – O_2
- вода – H_2O
- пища – $(\text{CH}_2\text{O})_n$
- Регенерация воздуха
- Очистка воды
- Удаление и переработка отходов

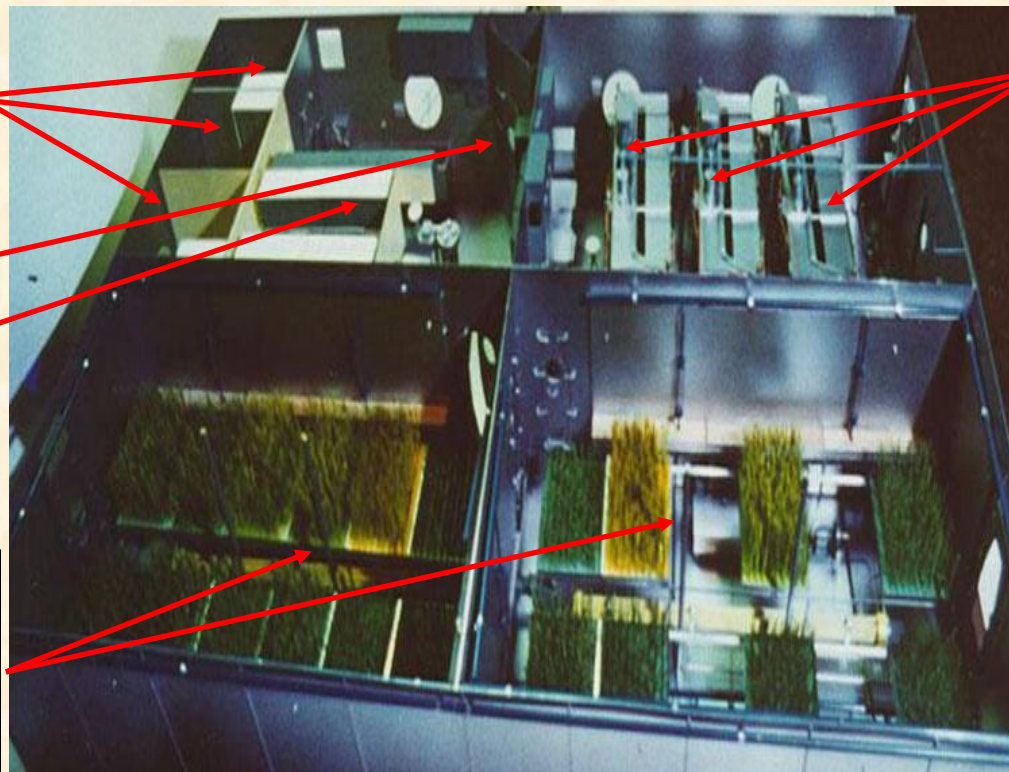
Регенерацию воздуха воды и частично пищи осуществляют с помощью растений.

Недостающую часть пищи пополняют из запасов.

Отходы удаляют из системы или используют после конверсии для выращивания растений.

Биорегенеративная система жизнеобеспечения БИОС-3 имела следующие характеристики

300 м³ общий объем



Зона отдыха:

3 кабины для экипажа, санитарно-гигиенический модуль, кухня-столовая

2 фитотрона с 20 ксеноновыми лампами по 150 Вт/м² ФАР; площадь для растений 20 м² в каждом фитотроне

Водорослевый культиватор:

3 фотобиореактора (20 л каждый), облученность 270 Вт/м² ФАР. Культиваторы с *Chlorella vulgaris* в 1978 были заменены на высшие растения для повышения степени замкнутости массообмена

БИОС-3: главные достижения:

Сбалансированная диета, высокая (до 50-60%) замкнутость по пище для экипажа, 100% замкнутость по воде и газообмену.

Основные медицинские результаты:

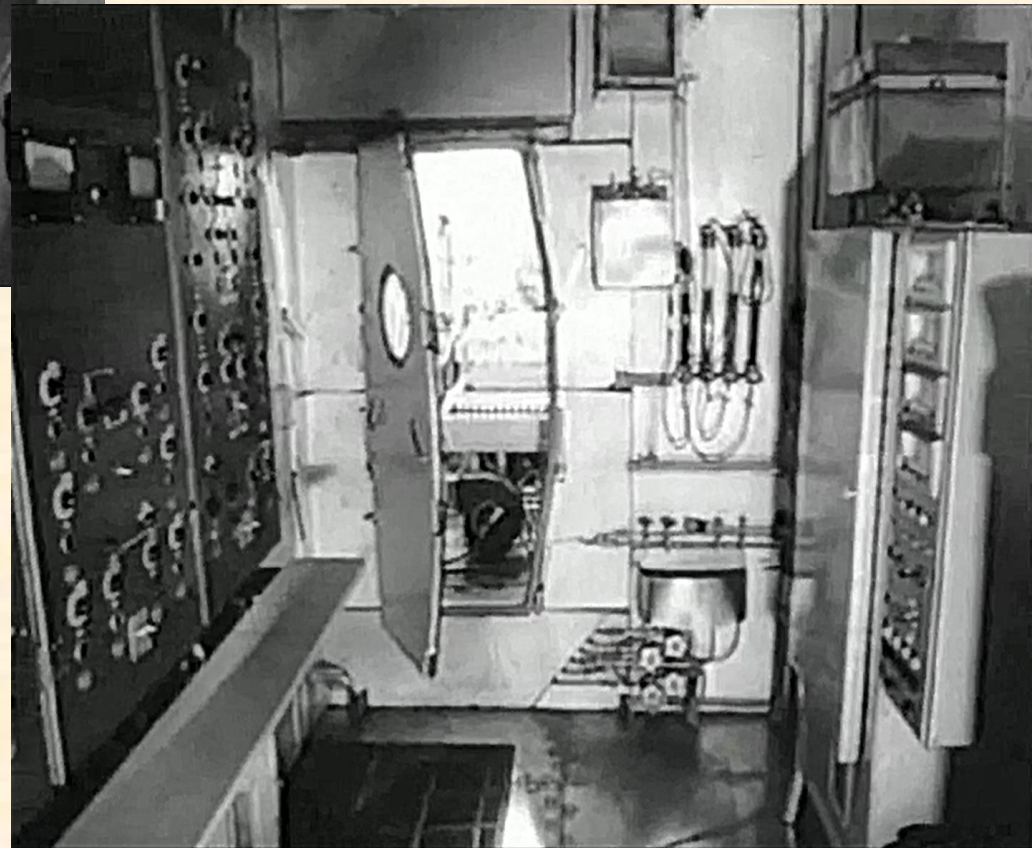
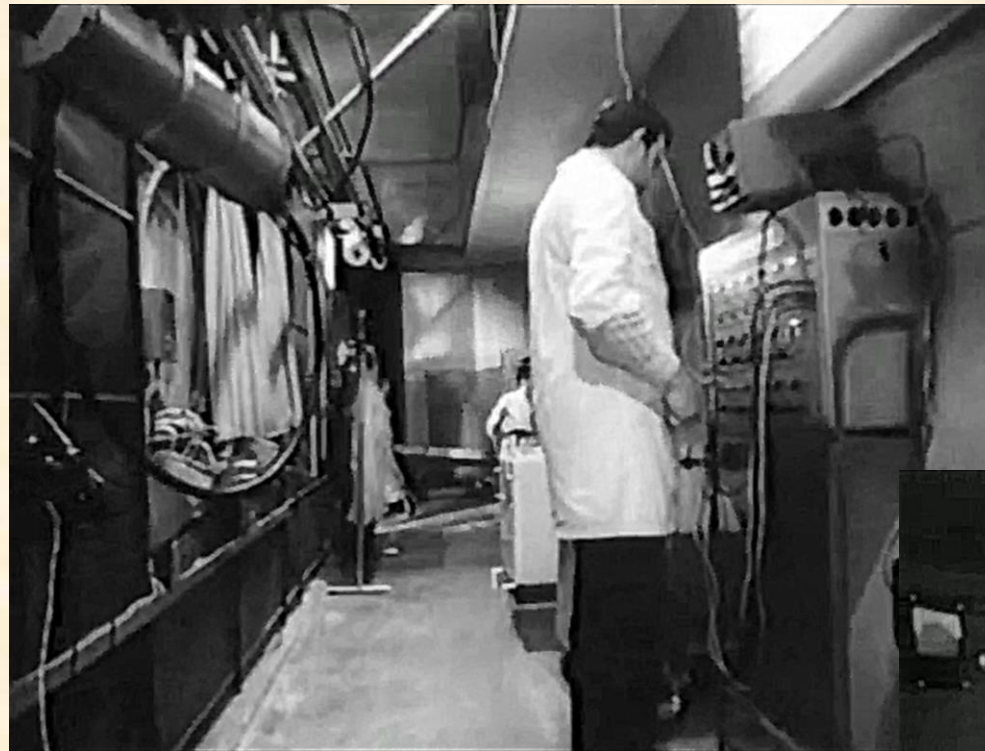
- Отклонений в здоровье экипажа не обнаружено
- Отдаленных последствий в здоровье экипажа, связанном с пребыванием в БИОС-3 (6 месяцев), не обнаружено

Селекция и испытание сортов растений в БСЖО



Ускоренное выращивание растений в условиях интенсивной светокультуры сэкономило селекционерам время на выведение новых сортов.

Кадры документального фильма «БИОС-3»



Без круговорота прожили бы 7 дней.
Жили 6 месяцев!

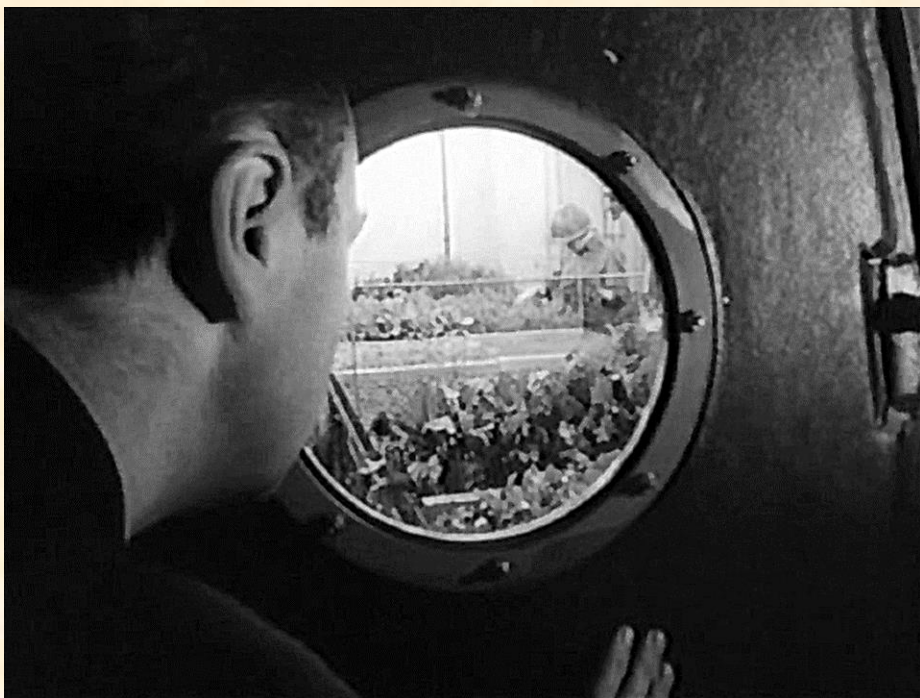
Медицинский контроль



Космический огород в БИОС-3



**Возрастной
конвейер
короткостебельной
пшеницы
в БИОС-3**



**НА ПУТИ К
УВЕЛИЧЕНИЮ
ЗАМЫКАНИЯ:
БИОС-4**

Проблема выбора оптимальной конфигурации СЖО

В цепочке: "удаление CO₂" – "регенерация воды" – "регенерация O₂" – "растительная пища", каждый очередной этап повышения степени замкнутости дает все меньший выигрыш по запасаемой массе. При этом на каждом этапе возрастает масса регенерирующей системы. Возникает вопрос о выборе наиболее оптимальной степени замкнутости массообмена в СЖО для данной экспедиции и одновременно оптимальной конфигурации структуры всего звена регенерации.

Когда мы говорим об оптимальности обязательно нужно указывать критерий оптимальности. В космонавтике традиционно ключевым показателем является масса используемых устройств.

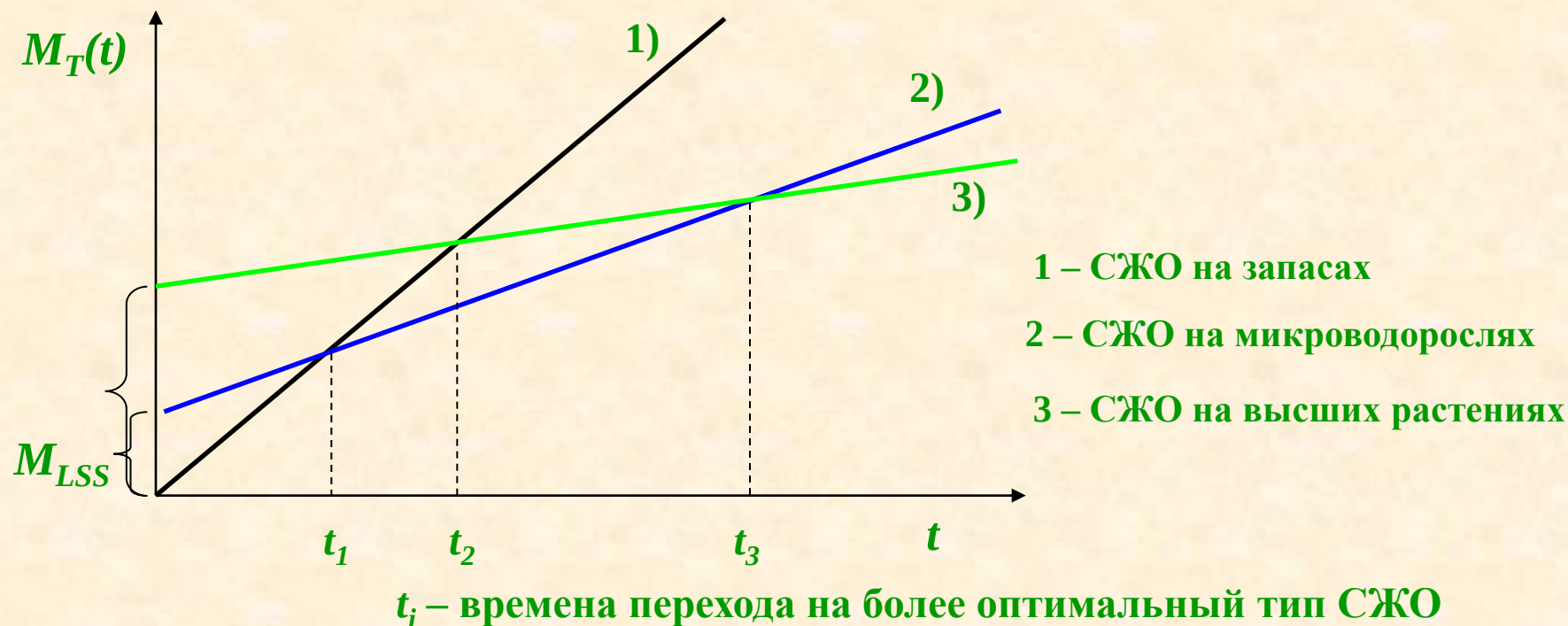
Критерий минимума "интегральной" массы СЖО

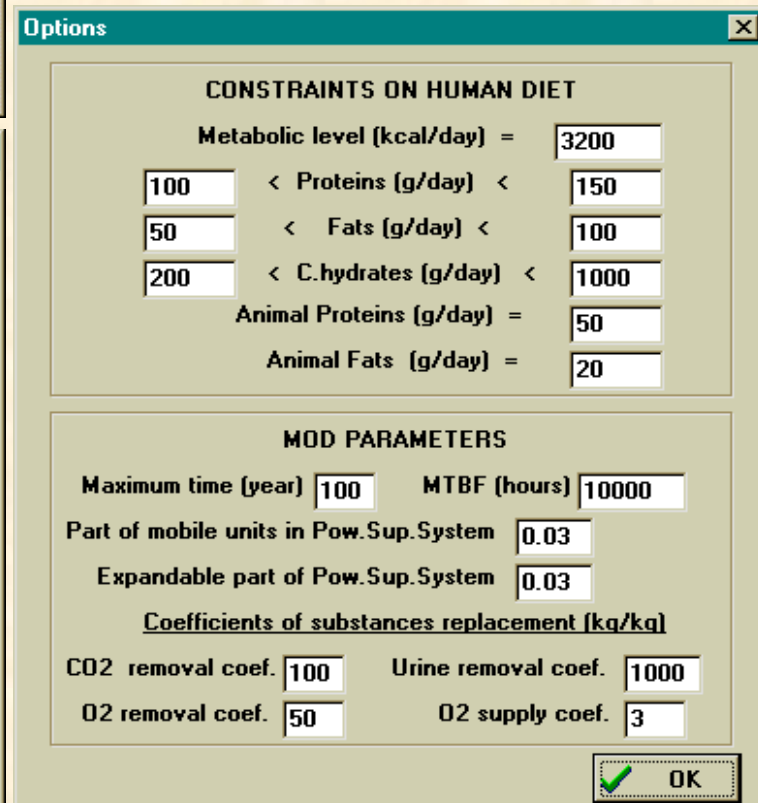
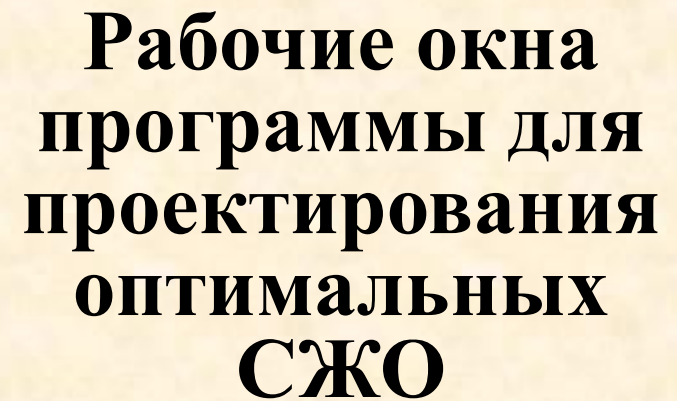
Рассмотрим следующий показатель:

$$M_T(t) = M_{LSS} + \Delta m \times t$$

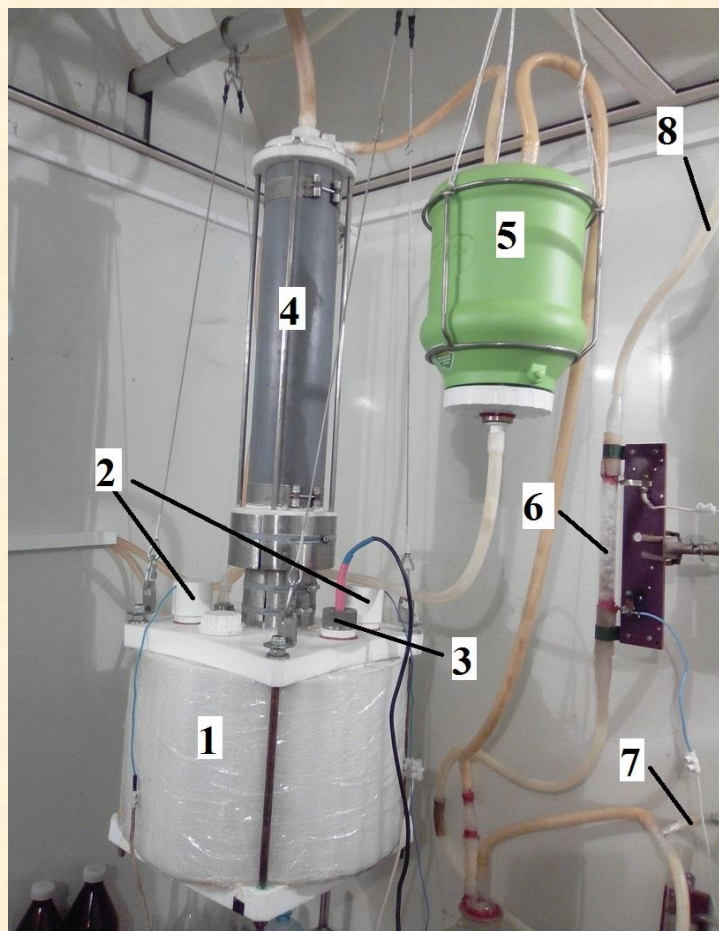
где M_{LSS} – масса постоянной (нерасходуемой) части СЖО; Δm – масса, поступающая в систему из запасов в единицу времени; t – время работы СЖО.

Легко показать, что в соответствии с данным критерием оптимальная конфигурация СЖО зависит от длительности экспедиции.





Физико-химический метод утилизации отходов жизнедеятельности человека



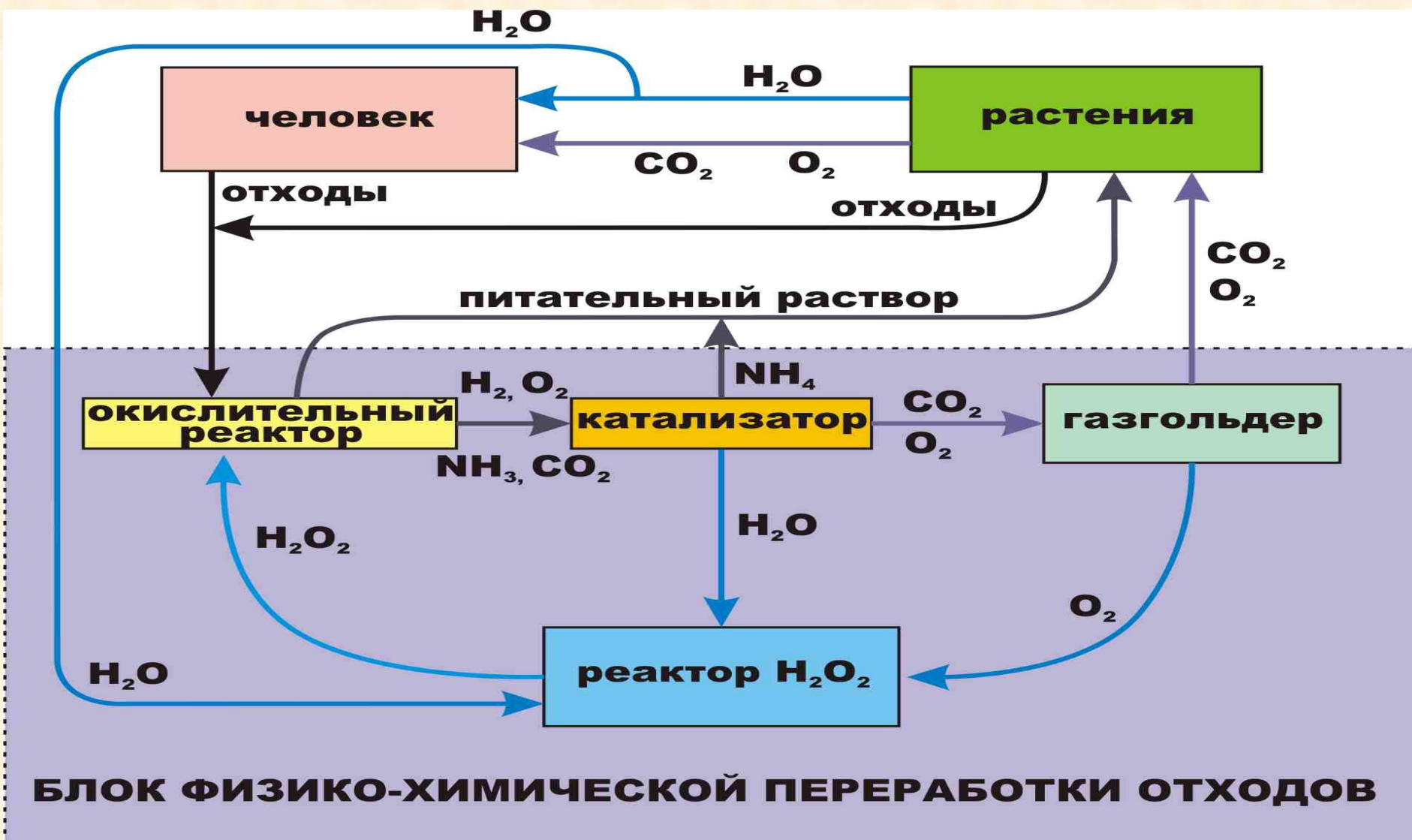
Реактор «мокрого» сжигания:

- 1) емкость реактора;
- 2) электроды;
- 3) датчик температуры;
- 4) водный холодильник;
- 5) пеносборник;
- 6) платиновый катализатор очистки выделяющегося газа;
- 7) трубка датчика давления;
- 8) выход газовых путей

Интерфейс программы автоматического управления



Схема встраивания физико-химического блока переработки отходов в массообменные процессы



Продукты Ф/Х (мокрого) сжигания органических отходов экологически безопасны для высших растений и возможно их использование в БСЖО



Контроль

Газ

Газ+Раствор

Раствор

Контроль - стандартные условия выращивания редиса

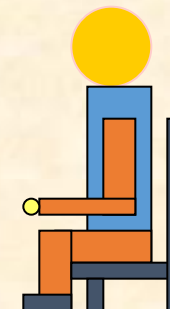
ГАЗ – питательный стандартный раствор Кнопа. Газ из реактора подавался в герметичную камеру для выращивания растений

Газ + Раствор - минерализованные экзометаболиты были использованы в качестве основы для приготовления питательных растворов, Газ из реактора подавался в герметичную камеру для выращивания растений

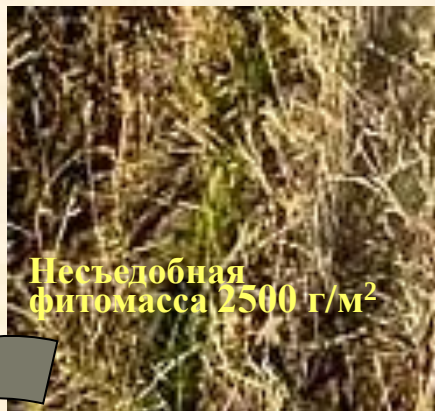
Раствор – растения выращены на растворе, приготовленном на основе минерализованных экзометаболитов человека.

ППС

Замкнутый цикл с регенерацией почвоподобного субстрата

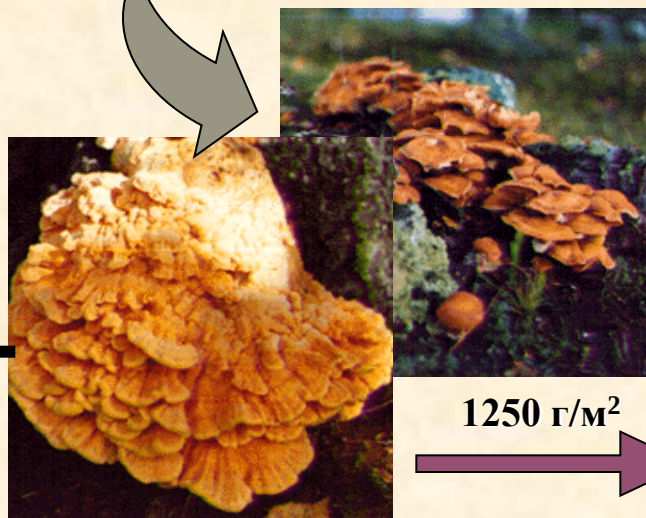


Т.В. + Ж.В.
за 2-е суток 250 г/м²



Вермикультура

Биогумус 625 г/м²



1250 г/м²

Грибы
250 г/м²

Круговорот NaCl



1. Выбран и успешно апробирован для условий БСЖО съедобный для человека вид солероса (*Salicornia europaea*), накапливающий до 50 % NaCl от своей сухой массы.
2. Показана возможность выращивания солеросов методом водной культуры на растворах, содержащих до 2% NaCl, что обеспечивает почти полный возврат NaCl в массообмен системы.

Внешний вид растений *Salicornia europaea*

А - общий вид

Б – после уборки

Разработка световых технологий интенсивного выращивания высших растений фототрофного звена

**Созданы интенсивные световые
технологии с интенсивностями света в
1,5-2 раза превышающие полуденный
солнечный свет , позволяющие получать
по 4-5 урожаев в год и выход зерна в 10
раз выше, чем в земных условиях на
средней географической широте.**

Апробация высокоинтенсивных светодиодных облучателей



«Объемные» световые технологии для замкнутых экосистем (на примере растений огурца)

А



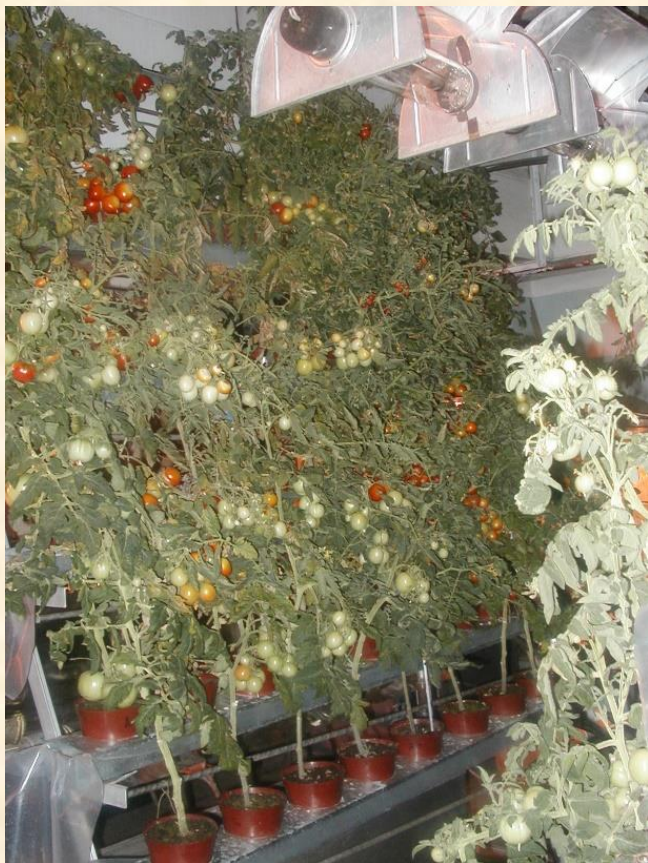
Б



А – общий вид ценозов огурца

Б – фрагмент изображения нижних ярусов растений огурца

Использование «объемных» световых технологий для короткостебельных растений томата и перца



Общий вид растений томата перед уборкой

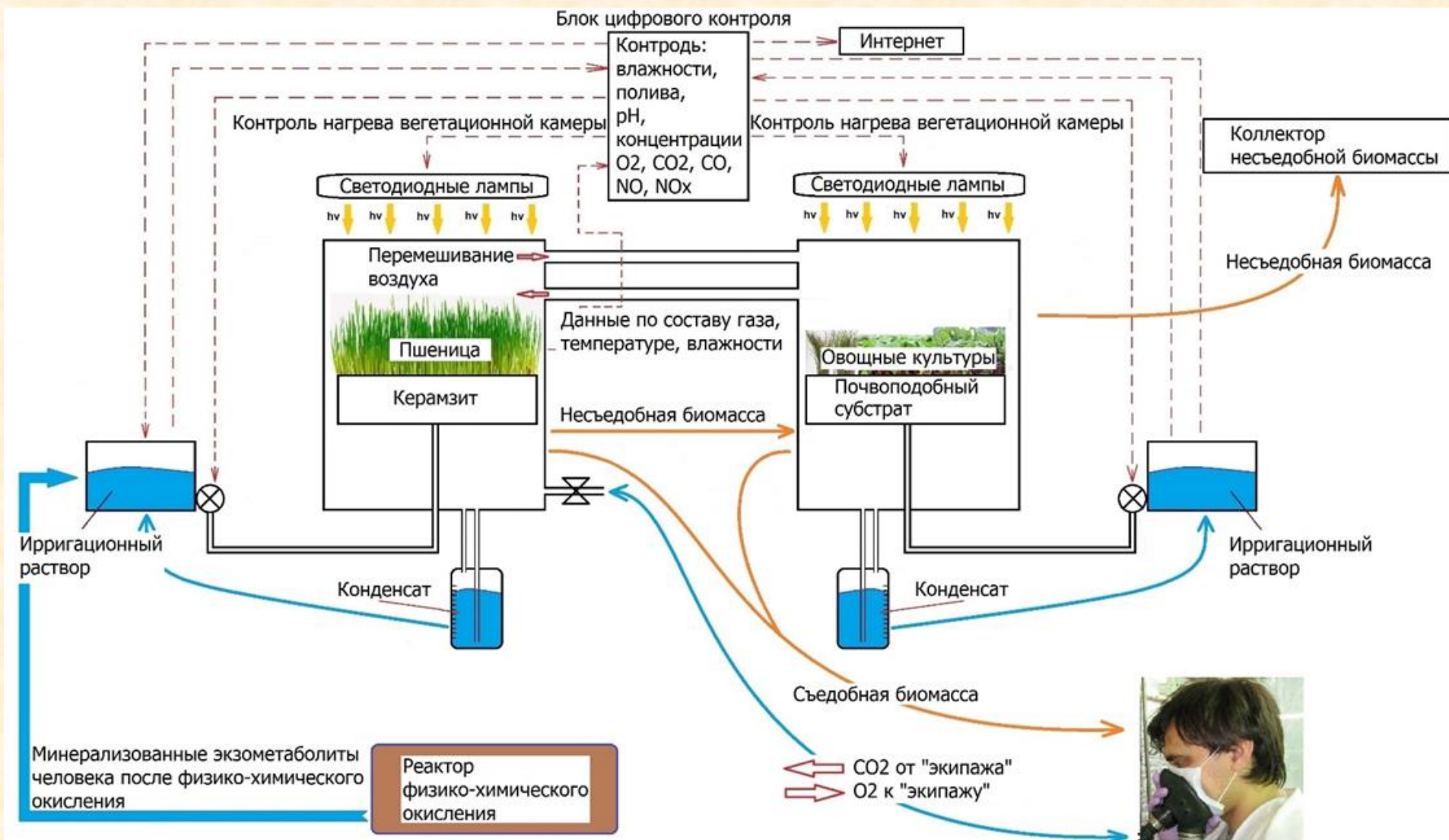


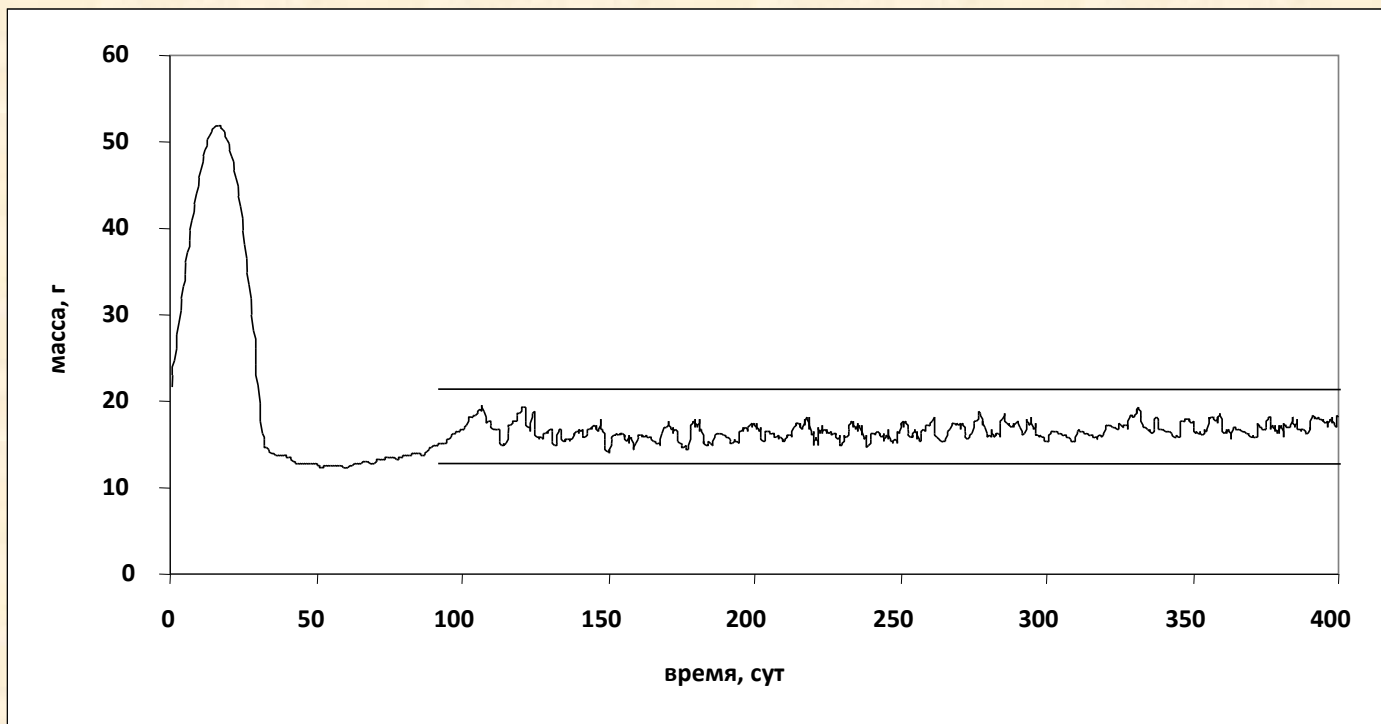
Общий вид растений сладкого перца перед уборкой

Фрагмент разновозрастного конвейера пшеницы



БСЖО «доли человека» - новый «малый» инструмент исследования круговорота

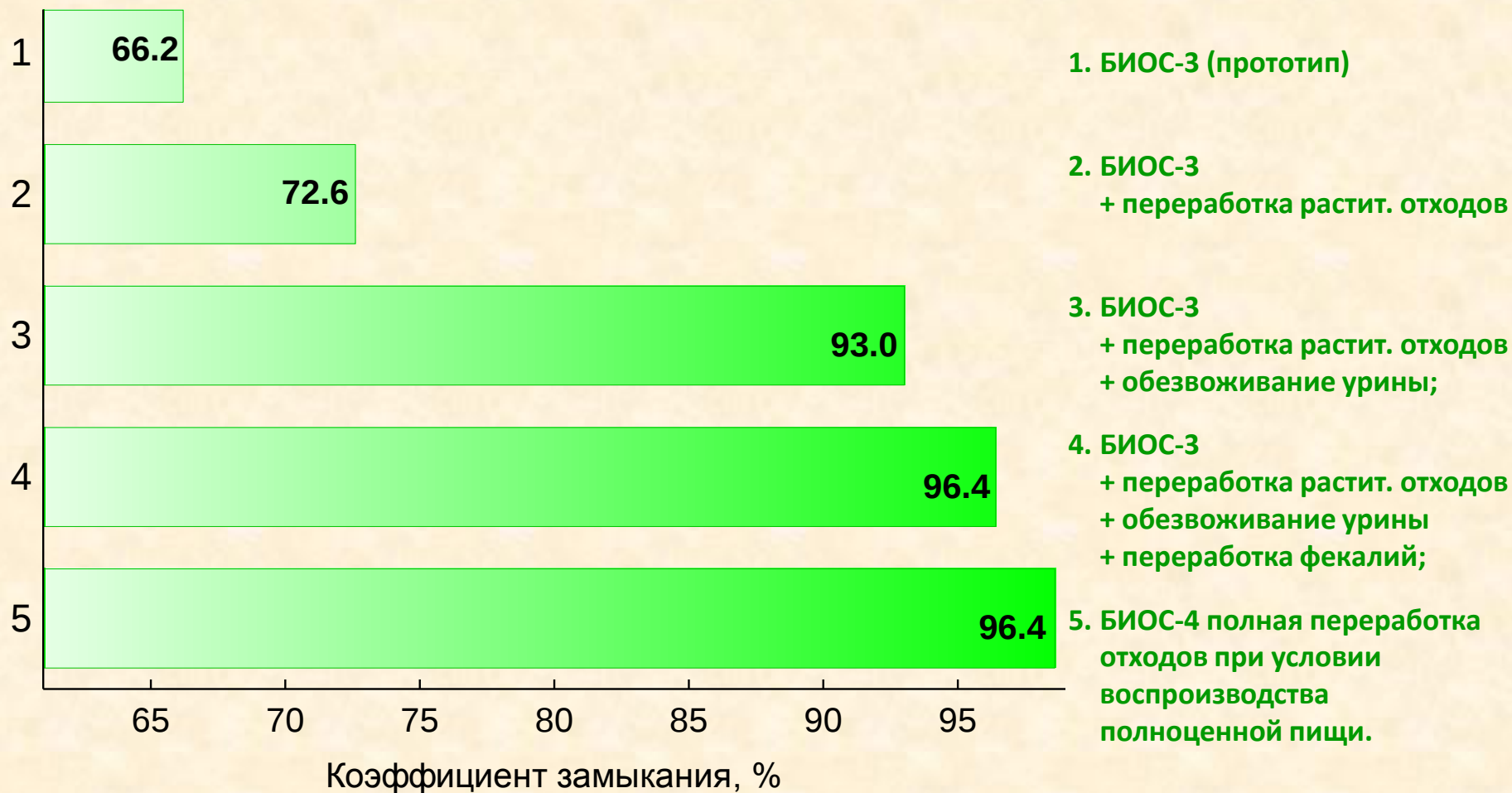




Модельный расчет динамики массы углекислого газа в системе. Линиями отмечены границы интервала экспериментальных значений.



Расчётные коэффициенты замыкания массообмена в комплексе БИОС с различными вариантами переработки отходов



ПРЕДЕЛЬНОЕ ЗАМЫКАНИЕ: БИОС-5

БИОС-5

Цель- предельное замыкание (около 100%) и полная диета, включая животные белки и др.

Метод: сочетание параметрического (как в БИОС-3) и генетического управления биосинтезом для производства растениями (через фотосинтез) и бактериями (через хемосинтез) белков, липидов, витаминов? и др. молекул, получаемых человеком традиционно при питании продуктами животноводства.

Фундаментальность:

1.Замкнутая СЖО человека есть предельно редуцированная по структуре (как, видимо, будущая биосфера), но сохраняющая основное свойство биосферы – замкнутый круговорот веществ. Это основа для выяснения механизма, поддерживающего сбалансированный круговорот веществ в земной биосфере, пределы ее устойчивости и УПРАВЛЕНИЯ.

2. Включение испытуемого в замкнутый круговорот веществ в «БИОСе» как инструмент исследования всей полноты его экзометаболизма в норме и патологии, что фундаментально важно для физиологии и биохимии человека в интересах медицины.

Общее заключение

1. Готовы новые технологии биологического и физико-химического окисления всех органических отходов человека для БИОС-4 (до 97% замкнуто).
2. Проверены принципы сопряжения этих технологий в «малой» СЖО.
3. Реализован круговорот с «долей человека» - **путь к новому БИОС-4!**
4. Земное приложение: ЭКОДОМА в Арктике.



Дмитрий Олегович Рогозин
Д.ф.н, д.т.н., Генеральный директор
Госкорпорации «Роскосмос»
Председатель госкомиссии по Арктике

Д.О. Рогозин назвал три стратегические задачи, которые стоят перед Россией в космической сфере: «расширение нашего присутствия на низких околоземных орбитах и переход от их освоения к использованию; освоение с последующей колонизацией Луны и окололунного пространства; подготовка и начало освоения Марса и других объектов Солнечной системы».

Пригласить Д.О.Рогозина на специальное заседание Президиума СОРАН с докладами-проектами по участию СОРАН в СНТР РФ для Роскосмоса:

➤ от ФИЦ КНЦ: БИОС-4 и ДЗЗ.

ДОЛЯ УЧАСТИЯ НАСЕЛЕНИЯ ПЛАНЕТЫ В ПЛАНЕТАРНОМ КРУГОВОРОТЕ

CO₂:

Ассимиляция CO₂ биосферой: около 210 ГтС/год

Выдыхание населением: $7,5 \cdot 10^9$ чел $\times$ 1 кг CO₂/сутки $\times$ 365 суток = 3 ГтС/год.

Процент вовлеченности: $3/210 \times 100\% = 1,4\%$.

O₂

Выделение O₂ биосферой: около 450? Гт/год

Потребление населением: 10 Гт/год.

Процент вовлеченности: $10/450 \times 100\% = 2,2\%$.

H₂O

Круговорот воды общий: 500 000 км³ = $5 \cdot 10^{20}$ см³.

Питьевая потребность населения: $7,5 \cdot 10^9$ чел $\times$ 3000 см³ (=3 л)/сутки $\times$ 365 суток = $8 \cdot 10^{15}$ см³/год.

Процент вовлеченности: $8 \cdot 10^{15} / 5 \cdot 10^{20} \approx 10^{-5}$

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ СЖО И ЗЕМНОЙ БИОСФЕРЫ

(на пути к Биосферике)

СЖО	БИОСФЕРА
Мало видов (до 10)	Много видов (>1 млн)
Нет буферных систем	Есть буферные системы
Человек-задатчик скорости круговорота	Нет звена-задатчика скорости круговорота
Управляемая изнутри	?
Круговорот 100% ?	Круговорот 100%
Надежность ?	Надежна
Проблема с полной диетой человека	Полная диета человека
Урожайность велика	Урожайность невелика
Механизм круговорота?	Механизм круговорота?

**ЗЕМНЫЕ
ПРИЛОЖЕНИЯ
СЖО**

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

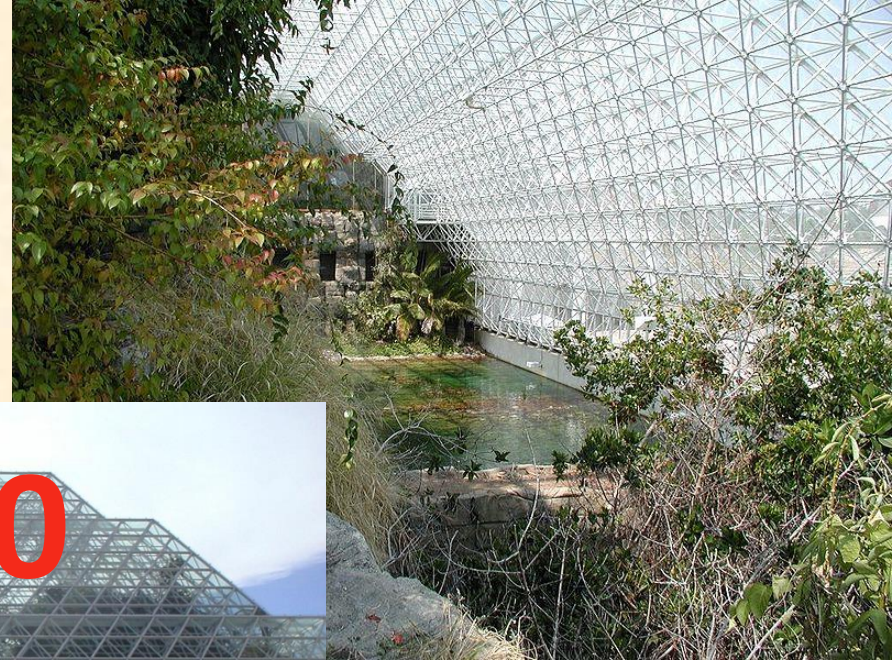
Как американцы Ноев ковчег делали

Автор и вдохновитель идеи – Джон Аллен

Спонсор – миллионер Эд Басс



«Биосфера-2(?)» — сооружение (1987- 1989), моделирующее замкнутую экологическую систему, построенное в пустыне Аризона (США).



**\$ 150
млн**

площадь 1.27 га
(БИОС-3: 0,01 га)
объем 203 760 м³
более 3 000 видов
7 биомов



“БИОС-3 был легендой для тех кто работал над замкнутыми системами жизнеобеспечения. Все данные были засекречены советским правительством. Красноярск был закрыт для иностранцев и многие в США вообще сомневались, что там что-то было сделано.”

JOHN ALLEN

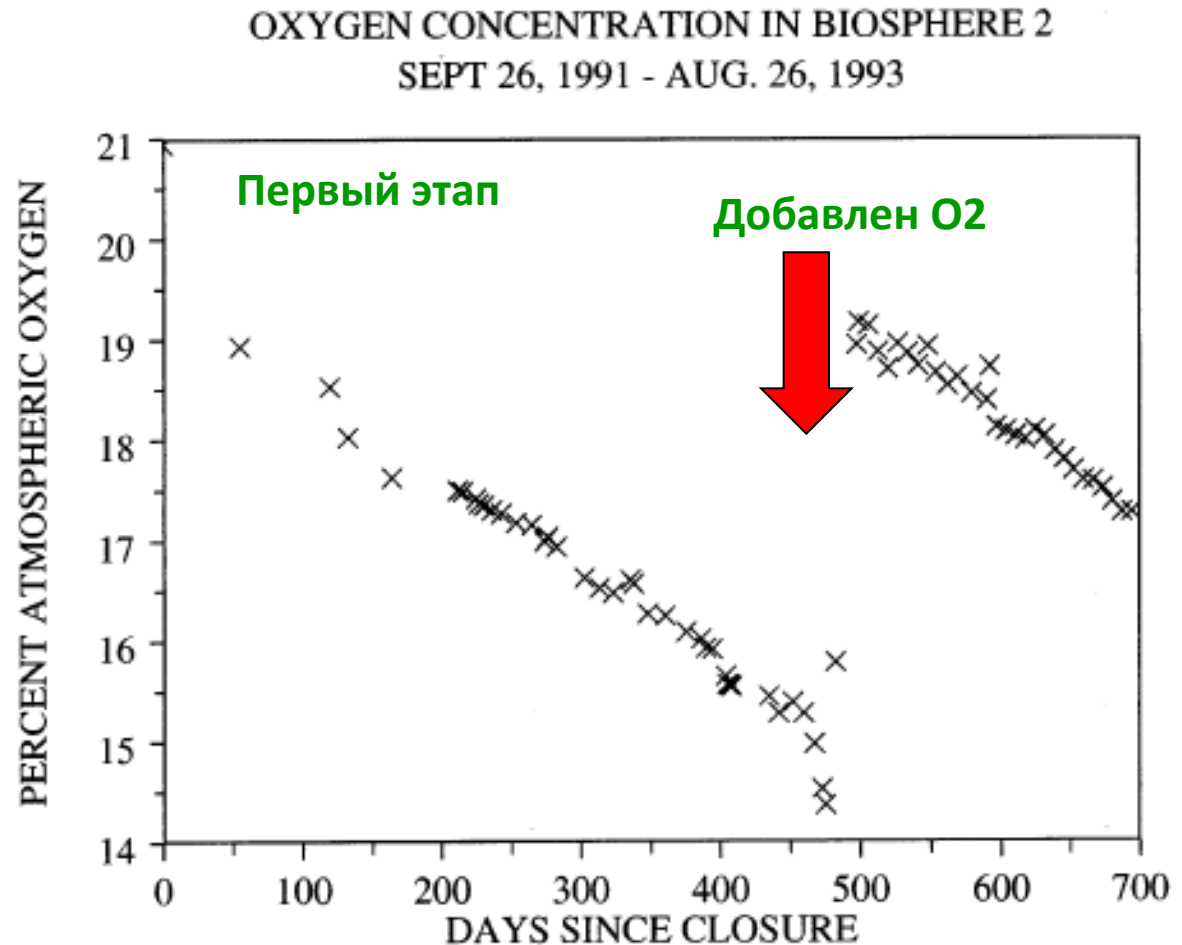
*Founder and former Vice-President of
Biospheric Development, Biosphere 2 Project,
Space Biospheres Ventures*

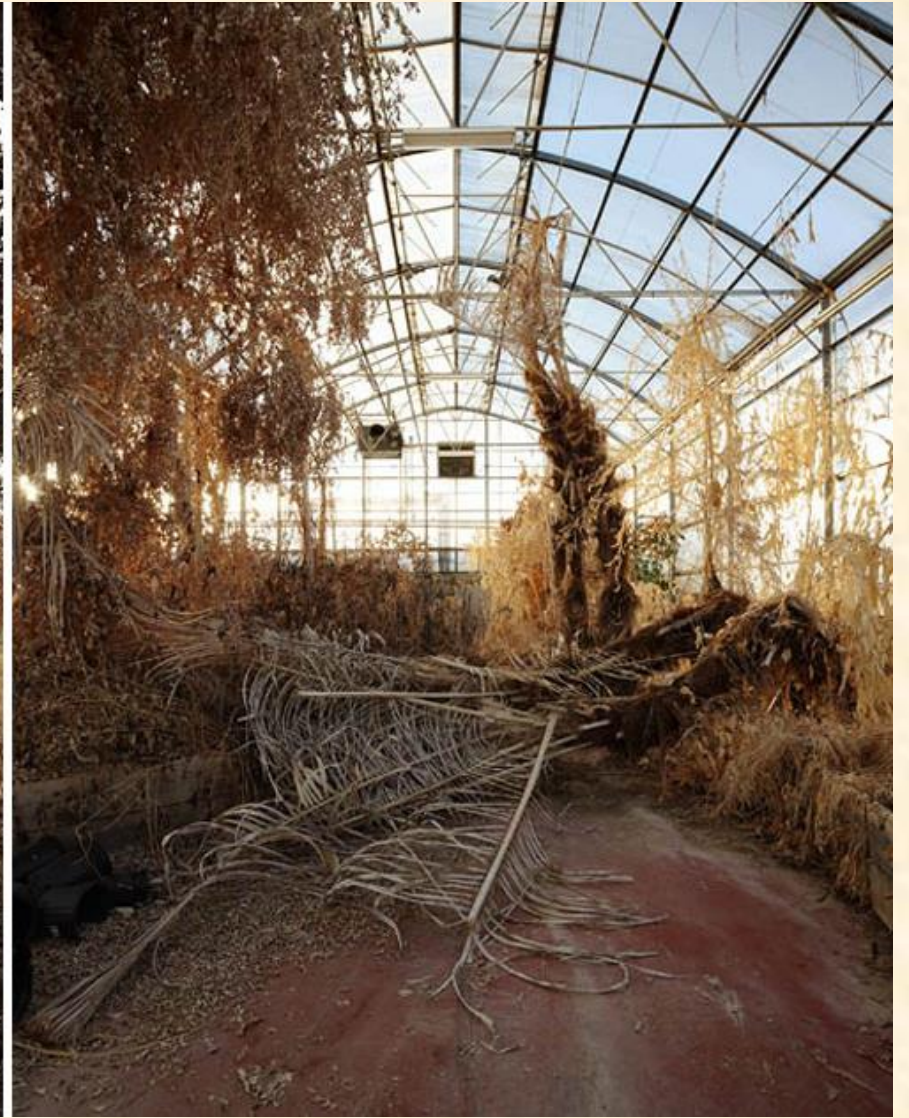
Идея — много видов как в природе
«сами» создадут круговорот, кислород,
воду и пищу.



Эксперимент был проведен в два этапа: первый с 26 сентября 1991 года по 26 сентября 1993 года и второй — в 1994 году (прерван из-за организационно-финансовых проблем).

Во время первого этапа уровень кислорода начал падать на 0,5% в месяц. Поскольку уровень кислорода упал до опасного уровня, было принято решение искусственно закачивать кислород извне. Ссоры в команде и в управлении привели к серии конфликтов и остановке эксперимента...



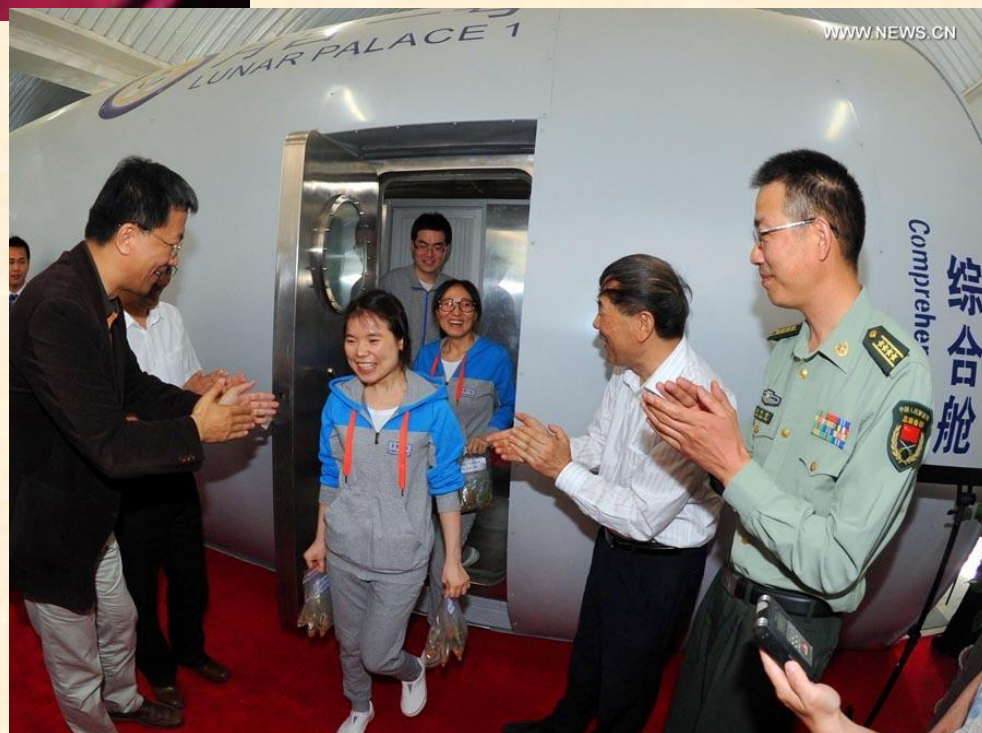


Китайская СЖО – «Лунный Дворец -1»





Китайское повторение опыта БИОС-3

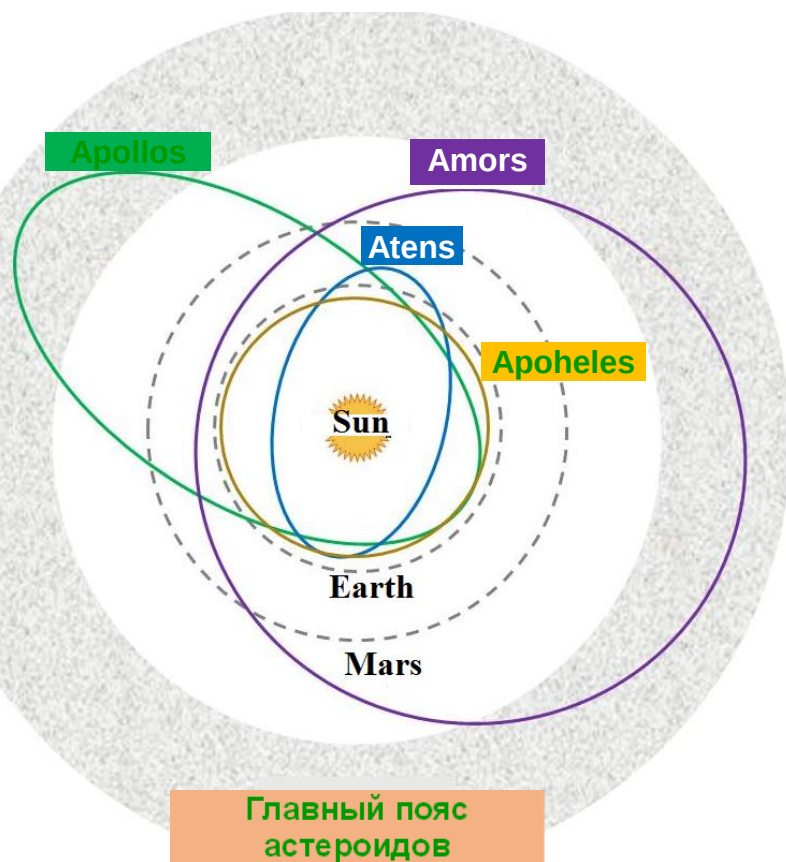




Колонизация астероидов – путь к освоению Солнечной системы

Почему астероиды?

1. **Защита:** Внутри астероида создается обитаемая зона на большой глубине (нет радиации - толстый слой породы).
2. **Гравитация:** Техника сейчас позволяет придать астероидам угловую скорость, обеспечивающую земной уровень тяжести внутри.
3. **Жизнеобеспечение:** СЖО обеспечит атмосферу, воду и еду для поселений.
4. **Астероиды обеспечены:**
 - строительными материалами;
 - богатыми месторождениями ценных металлов;
 - запасом рабочего тела для их «закрутки» и коррекции орбиты.



Эпигейные виды земляных червей (род *Eisenia*, сем. Lumbricidae)

Населяют только верхний слой почвы и
органических остатков.

Масса 0.5-0.6 г,
скорость роста ~ 0.02 г/сутки,
цикл развития ~ 15 суток



Показатель химического состава	Ncobela, Chimonyo, 2015: Animal Feed Science & Technology 208, 1-11 Khan, 2018: Journal of Applied Animal Research 46, 1144-1157	Introduction to Human Nutrition, Gibney et al. (Eds), Wiley-Blackwell, 2009
Сухая масса, %	40	
Белки, г/ кг сухой массы	620	> чем в рыбе
Жиры, г/ кг сухой массы	75	
Углеводы, г/ кг сухой массы	270	
Кальций, г/ кг сухой массы	15.0	≈ молочные продукты
Калий, г/ кг сухой массы	5.8	
Фосфор, г/кг сухой массы	27.0	≈ рыба
Железо, мг/ кг сухой массы	5.7	≈ яйца, куриное мясо
Лизин, г / 100 г	4.2	≈ свинина, говядина
Метионин, г / 100 г	1.0	
Треонин, г / 100 г	2.7	≈ свинина, говядина
Триптофан, г / 100 г	-	