

# Способы защиты от радиации и гипогравитации при колонизации Солнечной системы

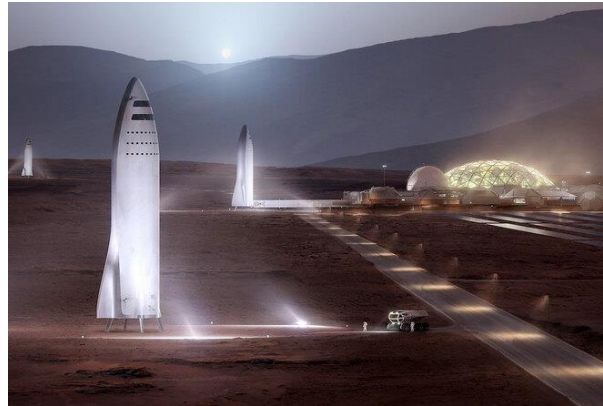
Майборода А.О.

Семинар НКЦ SETI 5 ноября 2021

*АННОТАЦИЯ. Колонизация планет требует решения проблемы защиты экипажа при межпланетных перелетах от солнечной и галактической радиации, невесомости во время длительного перелета и гипогравитации на внеземных базах. Если при полете на Марс доза облучения может быть уменьшена сокращением времени перелета с 260 суток до 100 дней, то при полетах к спутникам планет-гигантов уже не удастся существенно сократить длительность трансфера на основе достигнутого технического уровня. Проект Testudo предлагает технологию защиты от радиации при длительных перелетах. Проект Phoulkon предлагает защиту колонистов от гипогравитации посредством создания искусственной гравитации в колониях на поверхности планет.*

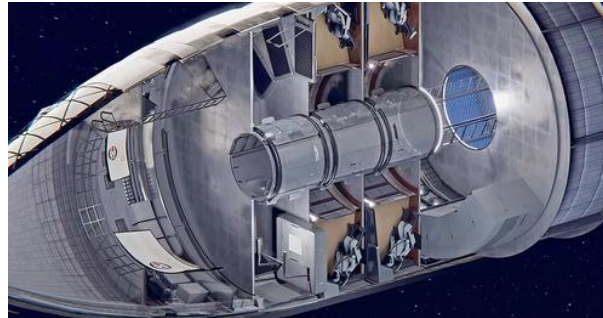
*Ключевые слова: протонная радиация, галактическое излучение, экранирование радиации, пакет межпланетных кораблей, невесомость, гипогравитация, искусственная гравитация, космические колонии, Марс*

Слайд 1.



Полеты на Марс и его колонизация – составная часть идеи космической экспансии. Инженерный проект экспедиции на Марс (DasMarsprojekt) был подготовлен еще в 1948 году. Однако, до сих пор сильны сомнения в возможности полетов на Марс до середины XXI века. Дело в том, что для межпланетных перелетов нужны не только ракеты и корабли, но и защита экипажа от космической радиации.

Слайд 2.1.



Согласно исследованиям ЕКА, во время полета на Марс человек получит дозу космической радиации, которая составляет около 60% от предельно допустимой. [Информация на сайте ЕКА, опубликованная 19 сентября 2018]. Соответственно, при полетах к спутникам Юпитера и Сатурна доза радиации будет смертельной (см. таблицы на слайде 2.2). Даже при полетах «в один конец».

**Таблица 13. Межпланетные экспедиции при гомановских траекториях перелетов туда и обратно**

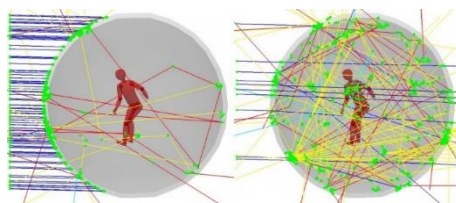
Небесное тело	Минимальная полная продолжительность экспедиции		Минимальное время ожидания, сут	Суммарная характеристическая скорость при старте с орбиты высотой 200 км, км/с		
				околоземная орбита — низкая орбита — Земля		околоземная орбита — поверхность — Земля
	сут	звездные годы		Реактивное торможение	Аэродинамическое торможение	
1	2	3	4	5	6	7
Меркурий	277,9	0,76	66,9	20,562	—	27,8
Венера	759,5	2,08	467,3	10,270	6,888	15,7
Марс	971,9	2,66	454,1	7,869	5,741 (?)	10,0 (16,4)
Юпитер	2209,6	6,05	214,6	42,23	24,27	75,5
Сатурн	4759,7	13,03	341,5	29,33	18,31	49,0
Уран	12058,1	33,01	341,9	21,56	14,77	33,0
Нептун	22646,9	62,0	281,3	22,81	15,53	35,6
Плутон	33602,5	92,00	293,9	14	—	16,6
Луна	10		любое	6,7	—	8,5

**Таблица 14. Межпланетные экспедиции при параболических траекториях перелетов туда и обратно**

Небесное тело	Минимальная полная продолжительность экспедиции		Минимальное время ожидания, сут	Суммарная характеристическая скорость при старте с орбиты высотой 200 км, км/с		
				околоземная орбита — низкая орбита — Земля		околоземная орбита — поверхность — Земля
	сут	звездные годы		Реактивное торможение	Аэродинамическое торможение	
1	2	3	4	5	6	7
Марс	152,6	0,42	12,8	43,491	26,121	30,4 (52,0)
Юпитер	1007,0	2,76	197,6	49,01	28,88	80,1
Сатурн	2124,1	5,82	276,1	35,13	21,94	52,6
Уран	5061,4	13,86	107,8	26,13	17,44	35,6
Нептун	9821,1	26,89	343,5	25,61	17,18	37,2
Плутон	14207,4	38,90	83,8	22,43	15,6	24,6
Луна	2		любое	5,6+5,8	—	9,6

*Длительность межпланетных перелетов при гомановских и параболических траекториях с возвращением на Землю. При полете в «один конец», например, на один из спутников Юпитера, длительность полета составит 998 суток (2,733 года).*

Слайд 3.



Большая часть излучения в космосе приходится на галактические космические лучи, и крайне малая «остается» на излучение Солнца. *Биологическое действие галактических лучей более тяжелое чем у солнечной радиации.* В результате воздействия галактических лучей на головной мозг космонавты, летящие на Марс, могут потерять координацию и память уже в полете. Для защиты требуется снабдить корабль обшивкой толщиной полтора метра, на основе вещества из элементов с малой атомной (молекулярной) массой.

Слайд 4.

Таблица 12. Касательные траектории полетов к Марсу (рис. 138)

Характеристика	Траектория							
	I (гомаоп-ская)	II	III	IV	V (параболическая)	II'	III'	IV'
Начальная геоцентрическая скорость, приведенная к поверхности Земли, $v_0$ , км/с	11,567	11,800	12,000	<u>13,000</u>	16,653	11,800	12,000	13,000
Геоцентрическая скорость выхода $v_{вых}$ , км/с	2,945	3,757	4,344	6,623	12,337	3,757	4,344	6,623
Гелиоцентрическая скорость выхода $V_{вых}$ , км/с	32,729	33,542	34,129	36,409	42,122	33,542	34,129	36,409
Период обращения $P$ , сут	517,8	583,5	641,7	1015,3	$\infty$	583,5	641,7	1015,3
Большая полуось $a$ , а. е.	1,262	1,367	1,456	1,977	$\infty$	1,367	1,456	1,977
Эксцентриситет	0,208	0,268	0,313	0,494	1,0	0,268	0,313	0,494
Афелийное расстояние, а. е.	1,524	1,734	1,911	2,954	$\infty$	1,734	1,911	2,954
Угловая дальность, град	180	128,8	116,3	92,3	71,8	231,2	243,7	267,7
Продолжительность перелета, сут	258,9	164,5	144,1	<u>105,2</u>	69,9	419,0	497,6	910,1
Дуга, проходимая Землей, град	255,2	162,1	142,0	103,7	68,9	413,0	490,4	897,0
Дуга, проходимая Марсом, град	135,7	86,2	75,5	55,1	36,6	219,6	260,7	476,9
Угол начальной конфигурации $\varphi$ , град	44,3	42,6	40,8	37,2	35,2	11,6	-17,0	-209,2
Момент старта, отсчитываемый от момента конфигурации I, сут	0,0	3,7	7,6	15,4	19,7	70,8	132,8	549,2
То же от момента противостояния Марса, сут	-96,0	-92,3	-88,4	-80,6	-76,3	-25,1	+36,8	+453,2
Расстояние Земля—Марс в конце полета, а. е.	1,595	0,880	0,759	0,579	0,528	2,524	2,128	1,833
То же, млн. км	238,6	131,7	113,5	86,5	78,9	377,5	318,3	274,2

364

ГЛ 16 ПОЛЕТЫ К МАРСУ

Возможным решением проблемы радиации, хотя и частичным, альтернативным утолщению обшивки, считается быстрый перелет – 70-100 суток, вместо энергетически выгодных 6-9 месяцев. Технически это реализуемо, хотя создает проблему входя корабля в разряженную атмосферу Марса на скорости в диапазоне от 8700 м/до 20900 м/с.

Слайд 5.



Однако при быстром перелете возникает проблема торможения корабля в разреженной атмосфере Марса – увеличивается риск промаха при вхождении в узкий коридор допустимых отклонений: 1 - корабль недостаточно затормозится и уйдет в межпланетное пространство; 2 - столкнется с поверхностью Марса.

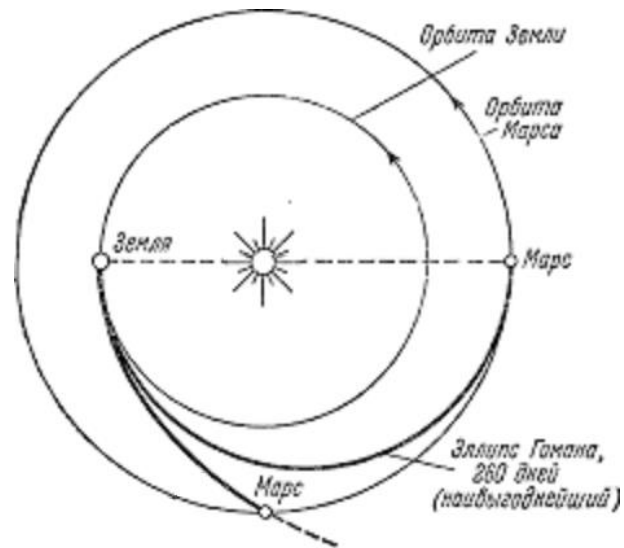
Слайд 6.



Высокая скорость вхождения в атмосферу требует также решения проблемы высокой надежности теплозащиты в связи ростом теплового излучения пропорционально температуре в четвертой степени. Разрушение теплозащиты из-за незначительных по объему микродефектов – третий элемент риска полета на Марс. **«Честно говоря, куча людей, вероятно, умрет вначале. Добраться туда непросто»**, — отметил Илон Маск, комментируя риски реализации своего плана колонизации.

При технически возможном, хотя и опасном быстром перелете (105 дней вместо 259) радиационное поражение сокращается, но непоправимый ущерб здоровью все равно наносится. Поэтому остается актуальной задача нахождения не только способов быстрого перелета, но и способов эффективного экранирования радиации при относительно медленном перелете.

Слайд 7.



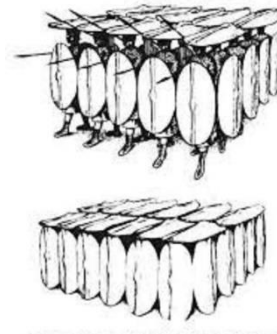
Решение проблемы защиты экипажа от радиации позволит вернуться к медленному перелету на Марс по траекториям близким к классической траектории Гомана (144-165 суток вместо 259), что одновременно существенно сократит расходы топлива и стоимость перелета.

Слайд 7.



До настоящего времени не существовало способа защиты от космической радиации при медленном перелёте. Использование защитных экранов добавило бы кораблю такую большую дополнительную массу, что стоимость миссии увеличилась бы до иррациональных величин. Так обстоит дело с эскадрами из небольшого количества кораблей, летящих на Марс. Однако, при полетах эскадры кораблей ситуация меняется в лучшую сторону. Появляется *неочевидный* ресурс для создания полноценной антирадиационной защиты. Этот эскадренный ресурс используется в проекте **Testudo**.

Слайд 8.



Суть проекта Testudo в следующем. План полетов на Марс, разработанный компанией SpaceX, предусматривает отправку в короткий срок эскадры численностью от 100 кораблей в первом запуске до 1000 кораблей через десятилетие. «Маск заявил, что планирует отправить на Марс 1 миллион человек к 2050 году. SpaceX построит флот из 1000 звездолетов, чтобы переправить их туда». По его словам, в ближайшие десять лет SpaceX планирует построить 1000 космических кораблей многоразового пользования DragonCrew (100 аппаратов в год), которые сегодня разрабатываются на заводе компании в Техасе. SpaceX планирует отправлять на Марс космические корабли с пассажирами примерно раз в 26 месяцев. Таким образом, благодаря большой численности эскадры создается возможность в случае изменения расписания – отправки кораблей на Марс не поочередно в течение одного месяца, а большой и компактной группой в один день, аккумулируя их перед стартом на орбите, – *использовать для защиты от радиации сами корабли*. Каждый корабль по отношению к другим кораблям является готовым экраном, частично защищающим от космической радиации. При высокой плотности роя кораблей в эскадре и правильной ориентации корабля жилые отсеки могут быть эффективно защищены многометровыми слоями топлива в баках ракет. Низкая молекулярная масса метана и кислорода повышает эффективность экранирования.

Слайд 9.

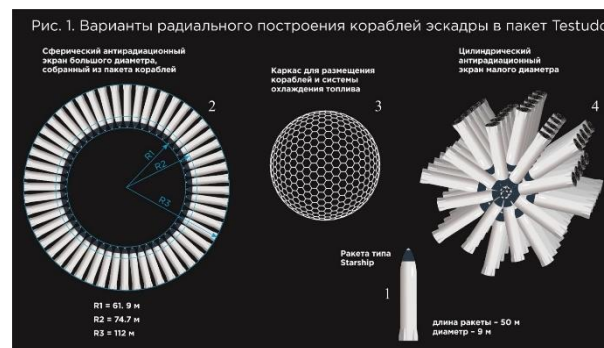


Рис. 1. Варианты радиального построения кораблей эскадры в пакет Testudo.

1 – корабль Starship.

2 – сферический антирадиационный экран большого диаметра, собранный из пакета кораблей.

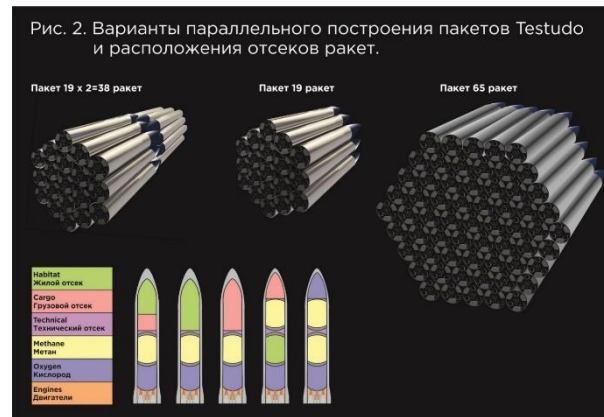


- 3 – каркас для размещения кораблей и системы охлаждения топлива.
- 4 – цилиндрический антирадиационный экран малого диаметра

Для одной тысячи кораблей оптимальная конфигурация построения представляет собой сферу, поверхность которой образована пакетом ракет в один слой или два слоя, ориентированных жилыми отсеками к центру сферы. Такое защитное построение эскадры подобно построению римского военного отряда, называемым Testudo или Черепаха. Резонно защитным пакетам ракет различной формы дать общее наименование Testudo (Тестудо).

На *рис. 1* «Варианты радиального построения кораблей эскадры в пакет Testudo» показаны возможные конфигурации пакетов кораблей при большой и малой численности эскадр. Для эффективного использования двуслойной сферы, которая не показана на рисунке, внешний слой должен собираться из непилотируемых аппаратов, которые транспортируют только топливо и грузы.

Слайд 10.



*Рис. 2.1. Варианты параллельного построения пакетов Testudo и расположения отсеков ракет.*

*Пакет 38 ракет + (12) = 19+19+(12)*

*Пакет 19 ракет*

*Пакет 65 ракет*

*Двуязычная таблица расшифровки цветowych обозначений*

На *рис. 2* «Варианты параллельного построения пакетов Testudo и расположения отсеков ракет» показаны возможные конфигурации пакетов ракет и положения жилого отсека.



Слайд 11.

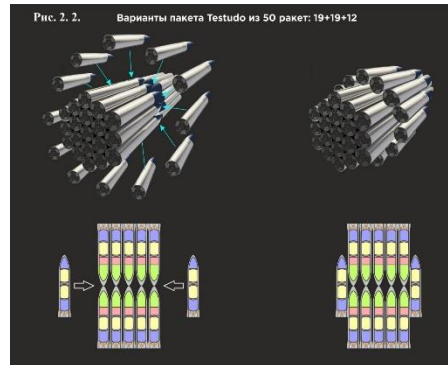


Рис. 2.2. Варианты параллельного построения пакетов Testudo из 50 ракет с типовым расположением жилых отсеков.

На рис. 2.2 показаны варианты параллельного построения пакетов Testudo из 50 ракет с типовым расположением жилых отсеков.

Слайд 12.

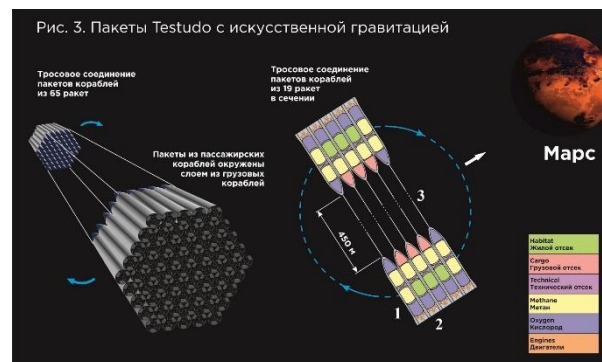


Рис. 3. Пакеты Testudo с искусственной гравитацией.

- 1 – грузовой корабль Starship.
- 2 – пассажирский корабль Starship.
- 3 – тросовое соединение пакетов кораблей

На рис. 3 «Пакеты Testudo с искусственной гравитацией» показана связка тросами пакета кораблей, раскрученных для создания искусственной силы тяжести. Сила искусственного тяготения может выбираться равной земной или марсианской.

После исчерпания полетного ресурса корабли Starship выгодно использовать как элементы конструктора с типовыми деталями при создании больших околосолнечных и околоземных колоний, защищенных от радиации и от невесомости.



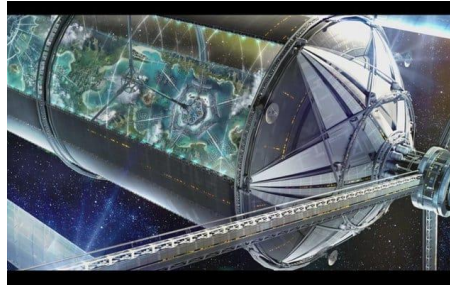
*Марсианский челнок для перевозки с орбит на Марс до 900 человек. Параметры марсианского челнока соответствуют параметрам суборбитального корабля для межконтинентальных перелетов на Земле. Известно, что суборбитальные полеты будут проходить на скорости около 20 чисел Маха, что подходит для челнока на Марсе.*

Каждый корабль самостоятельно совершает посадку или *выходит на орбиту вокруг планеты*, где разгружается челноком, курсирующим между планетой и орбитой... За счет экономии топлива, создается *возможность полного ракетного торможения* (на 2,128 км/с) или частичного (за счет атмосферы) при выходе на низкую круговую орбиту спутника Марса с гомановской траектории, что повышает безопасность полета. С мета-гомановской экономной траектории за счет реактивного торможения также возможен выход, например, на эллиптическую орбиту. В этом варианте выгодно не совершать посадку на Марс в корабле перелета, а для доставки пассажиров и грузов использовать челноки на марсианском топливе, курсирующие между планетой и кораблями на орбите.

Корабли посадки на Марс могут быть в составе пакета Testudo во внешнем защитном слое, с увеличенным числом посадочных мест из-за отсутствия кают. Такие корабли аналогичны разработанным SpaceX суборбитальным пассажирским кораблям с числом посадочных мест для **853** человека. Вместимость межпланетного корабля – **100** человек. Соответственно на каждые 8-9 межпланетных кораблей в наружном слое ракетного пакета необходимо иметь 1 посадочную ракету. Запаса топлива посадочного корабля хватает для высадки пассажиров на Марс и возвращения на орбиту. В последующем новые экспедиции могут не доставлять новые посадочные корабли, но доставлять для них только топливо. Производство топлива на Марсе устранил и эту необходимость в снабжении посадочных кораблей топливом, доставляемом с Земли. Разумеется, первоначально придется заранее доставать запасы топлива для возвращения межпланетных кораблей на околоземную орбиту, например, при помощи экономных ракет с ЭРД.

При использовании для высадки колонистов челноков, корпуса основной массы кораблей эскадры могут быть изготовлены не из стали, а из традиционных алюминиевых сплавов, что также полезно для повышения эффективности антирадиационной защиты, так как влечет меньшую вторичную радиацию.

Слайд 14.



Космические колонии с искусственной силой тяжести – не единственный способ размещения колонистов за пределами Земли. Технически осуществимы поселения на планетах с гипогравитацией, в которых также создается искусственная тяжесть за счет вращения корпуса колонии.

Слайд 15.



Проект GraviCity

Пример вращающейся колонии на Луне с искусственной гравитацией на уровне земной силы тяжести. За основу конструкции принята типовая конструкция орбитальной колонии Дж. О`Нила. Издержки размещения колонии на специальной вращающейся платформе компенсируются повышенной защитой от метеорной и радиационной опасности, доступностью сырьевых ресурсов, размещением промышленных объектов вне колонии.

При необходимости GraviCity может быть городом для населения в десятки тысяч колонистов. На рис. 4 «Цилиндрический город с искусственной гравитацией» показан лунный аналог орбитальной колонии на 10 тыс. человек. Меркурий, Церера и Титан также подходят для строительства таких городов. Особенность Титана будет в использовании ветра для поддержания вращения конструкции. Малое тяготение и плотная атмосфера Титана позволяют также создавать парящие привязные города.



На *рис. 5* «Тороидальный город с искусственной гравитацией» показаны два варианта городов для Марса. Аналогом города является вращающаяся тороидальная конструкция орбитальной колонии. Первоначальный город представляет собой поселение, составленное из кораблей с исчерпанным летным ресурсом. Рабочее название – **Phoulkon** (Фулкон), что является наименованием защитного построения римского воинского отряда в форме «Черепаша». на греческом языке.

На первом этапе, по мере исчерпания рабочего ресурса кораблей Starship (12-15 полетов), одновременно с орбитальными колониями будут создаваться напланетные колонии непосредственно на поверхности Марса, поскольку этот этап обеспечен ресурсами в виде кораблей с отработанным летным ресурсом. На Марсе корабли собираются в тороидальные пакеты, которые за счет вращения на специальном фундаменте создают привычную силу тяжести для колонистов.



Марсианские поселения традиционного типа, в которых колонисты испытывают марсианскую гипогравитацию, опасны для здоровья. По своим последствиям, гипогравитация аналогична длительной невесомости. Негативный результат наступает, только с отсрочкой во времени.

Вот характерный пример. Долгое пребывание в условиях гипогравитации чревато атрофией сердца. К такому выводу пришли специалисты из Техасского университета в Далласе, сравнившие последствия для сердца астронавта Скотта Келли, который провел целый год в космосе, и пловца Бенуа Леконта, который специализируется на марафонских дистанциях. За 159 дней Леконт преодолел 2821 километр. До 17 часов в день он проводил в горизонтальном положении.

В обоих случаях сниженная по сравнению с обычной силой тяжести нагрузка на сердце вела к его атрофии. В обоих случаях физических упражнений было недостаточно, чтобы помешать таким изменениям.

Усиленный режим тренировок не помог астронавту Келли избежать частичной сердечной дистрофии. В случае с Леконтом **исследователи вначале полагали, что физические нагрузки, которые испытывал пловец, находясь в воде, окажутся достаточными, чтобы не привести к потере массы сердечной ткани. Однако, у пловца наступила дистрофия сердца.**

Расширение предсердий, может привести к мерцательной аритмии. Это, в свою очередь, может не только помешать физическим упражнениям, но и привести к инсульту.

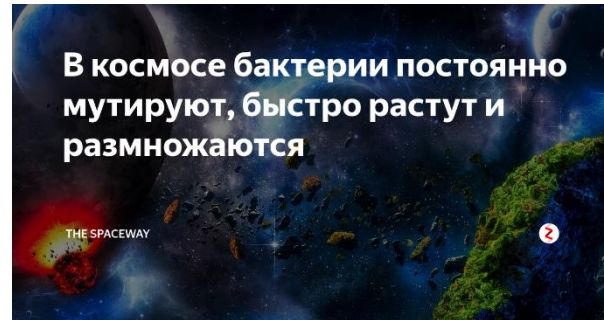
Слайд 18.



Центрифуга с коротким радиусом

За время пока колонисты привыкнут к марсианскому тяготению, мышечная и костная ткань атрофируются, и возвращение на Землю станет невозможным. Колонистам придётся постоянно подвергать себя серьёзным физическим тренировкам, чтобы оставаться в форме. Однако, как показал опыты, даже регулярное (по несколько часов в день) использование центрифуг с коротким радиусом не устранят угрозу для здоровья.



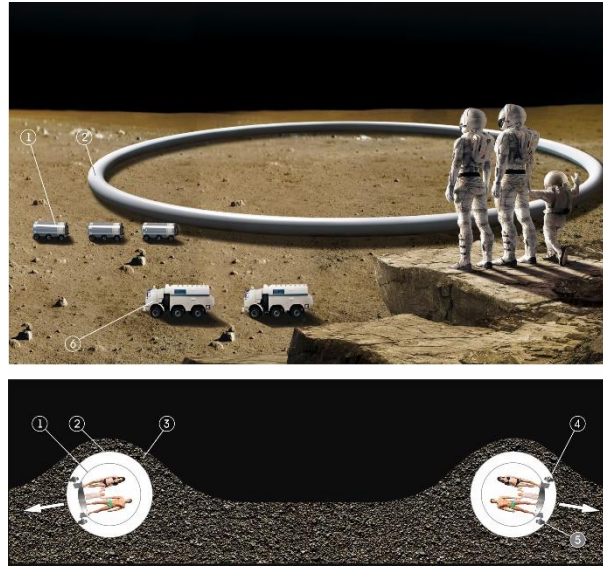


В космосе бактерии постоянно мутируют, быстро растут и размножаются. «Для бактерий ситуация складывается иначе [чем для людей]. Как отметили американские ученые, **пребывание в условиях микрогравитации вызвало у бактерий стойкие физиологические и генетические изменения, улучшающие их способность к росту и формированию колоний**». Гипогравитация – такой же мутагенный фактор, как и космическая радиация. Это значит, что **если на марсианской (или лунной) базе будут блоки вне зон с искусственной гравитацией, то в этих блоках с пониженным уровнем тяготения будут размножаться и далее распространяться по всей базе опасные бактерии-мутанты**. Если же на всей лунной станции создать искусственную гравитацию земного уровня, то не останется зон, где активно мутируют бактерии.



Без искусственной гравитации колонизация Луны и Марса не состоится – есть риск того, что бактерии-мутанты станут слишком опасными для жизни. Причина мутаций даже не повышенная радиация. Причина – капиллярные эффекты, действующие иначе в условиях пониженного тяготения и невесомости.





Идея применения искусственной гравитации на Луне, Марсе и других небесных телах далеко не очевидна. Вот важное обобщение понимания ситуации с искусственной гравитацией в общественном создании, данное нашим коллегой. **«У меня была такая формулировка: в космосе легко решить проблему искусственной тяжести с помощью вращающихся конструкций, но трудно решить проблему радиации, а на Луне легко решить проблему радиации, но трудно – проблему искусственной тяжести. Нет места, где обе проблемы решаются легко».**

## Выводы

1. Проект Testudo показывает возможность сокращения дозы облучения экипажа не только за счет сокращения времени перелета при использовании энергоемких субпараболических траекторий, но и за счет создания эффективной антирадиационной защиты при большом времени перелета по экономной траектории Гомана. Проект Testudo осуществим при соединении в пакет минимум 19 кораблей типа Starship.
2. Пакеты Testudo из отработанных кораблей Starship открывают возможность строительства межпланетных топливных депо и защищенных от радиации больших орбитальных станций с искусственной гравитацией возле колонизируемых планет.
3. Космические поселения на Луне, Марсе, Церере, Титане и других небесных телах могут быть защищены от гипогравитации, присущей типовым напланетным поселениям. Вращение жилых модулей поселения, создающих искусственную силу тяжести, возможно не только в космосе, но и на планетах при незначительных затратах по сравнению с орбитальными поселениями. Независимо от решения проблемы медикаментозной защиты населения от гипогравитации, поселения-центрифуги обеспечат космическую экспансию по всем малым телам Солнечной системы.
4. Медицинские обстоятельства настоятельно требуют отказа от типовых планов марсианской базы и поселений без искусственной гравитации.
5. Планы колоний, предусматривающие для создания искусственной гравитации использование центрифуг с коротким радиусом, также должны быть отклонены в пользу центрифуг с большим радиусом и большим жилым объемом, позволяющим экипажу функционировать без ограничений положения тела и подвижности.
6. Бактериальная опасность требует исключить или минимизировать в составе жилых помещений базы зоны, в которых отсутствует искусственная гравитация и потому могут происходить мутации микроорганизмов.

## Литература

1. Майборода А.О. Долговременная лунная база с искусственной гравитацией и минимальной массой конструкции // Воздушно-космическая сфера. 2019. №3. С. 36 – 43. URL: [https://www.vesvks.ru/public/wysiwyg/files/VKS-3\(100\)-2019-web-36-43.pdf](https://www.vesvks.ru/public/wysiwyg/files/VKS-3(100)-2019-web-36-43.pdf)
2. Майборода А.О. Искусственная гравитация для постоянной лунной базы // Энергия: экономика, техника, экология» 2020. №4. С.15-19.  
URL: [https://www.jiht.ru/science/temp/15-19%20%D0%9C%D0%B0%D0%B9%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B0\\_compressed.pdf?fbclid=IwAR1dJnGJGjEO6kKjUfvNZIf\\_ITx8zqCkMd0fosequ5N9FkzvHg-cIgmUeNI](https://www.jiht.ru/science/temp/15-19%20%D0%9C%D0%B0%D0%B9%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B0_compressed.pdf?fbclid=IwAR1dJnGJGjEO6kKjUfvNZIf_ITx8zqCkMd0fosequ5N9FkzvHg-cIgmUeNI)
3. Майборода А.О. Эффективные способы защиты от космических факторов в межпланетном корабле и внеземной колонии // Воздушно-космическая сфера. 2021. № 3. С. 32 – 41. URL: [https://www.ashurbeyli.ru/public/flipboard/3vks2021/?fbclid=IwAR3E\\_J2eyF-1SHuGwmlEz8YuCs567sj-qIr9tTBPJ6H4CKJo9etWxxngHA8#page=34](https://www.ashurbeyli.ru/public/flipboard/3vks2021/?fbclid=IwAR3E_J2eyF-1SHuGwmlEz8YuCs567sj-qIr9tTBPJ6H4CKJo9etWxxngHA8#page=34)
4. Пол Ринкон. Долгое пребывание в космосе чревато атрофией сердца // BBC. 30 марта 2021. URL: <https://www.bbc.com/russian/features-56572052>
5. Екатерина Рощина. Центрифуга не спасла людей от когнитивных изменений в условиях микрогравитации // N+1. 19 марта 2021.  
URL: [https://nplus1.ru/news/2021/03/19/artificial-gravity-and-cognitive-effects?fbclid=IwAR30nSpe4l9bQTaiTq5onGhi4tJJ\\_3AtzPUgT2yUaqd8LaXjihzoJAqGves](https://nplus1.ru/news/2021/03/19/artificial-gravity-and-cognitive-effects?fbclid=IwAR30nSpe4l9bQTaiTq5onGhi4tJJ_3AtzPUgT2yUaqd8LaXjihzoJAqGves)