

[Get a PDF](#)

# К вопросу о коррекции климата Марса

Евгений Бобух

Скорее популярно, чем научно

Внимание! Сервер [tung-sten.no-ip.com](http://tung-sten.no-ip.com) переехал на [www.bobukh.com](http://www.bobukh.com). Новый адрес этой страницы -- <http://tung-sten.no-ip.com/Texts/Popsci/Mars.Climate/Mars.Climate.htm>. Доступ через старый домен в какой-то момент прекратится. Пожалуйста, обновите Ваши закладки.

## Intro

Недавно [пропок](#) предложил мне высказаться в ЖЖ вот по какому вопросу: "Как обустроить жизнь на Марсе. В идеале, — чтоб можно было жить там постоянно, а по улице ходить в одной лишь кислородной маске."

Хотя настоящим специалистом в этой области я не являюсь, кое-какими познаниями научно-популярного уровня, возможно, интересными общественности, всё-таки обладаю. Ими и поделюсь.

В ходе изложения мне придётся ссылаться на большое количество фактов из планетологии и близких дисциплин. Вставлять ссылки на источники каждый раз не буду, т.к. большинство этих сведений общеизвестны "в узких кругах". Желающим разобраться рекомендую литературу по теме в конце текста.

## А в чём, собственно, проблема?

Вплоть до 70-х годов прошлого столетия большинство фантастов [Бредбери, Стругацкие и др.] описывали Марс как планету хоть и неуютную, но в принципе подходящую человеку. Навроде прохладных высокогорных Кара-Кумов. Многие всерьёз ожидали найти там жизнь. Когда в 60-х первые станции полетели к Марсу, ожидания общественности перевалили через оптимизм и достигли настоящей эйфории. Их столкновение с грубой реальностью сделанных открытий было настолько болезненным, что вызвало жестокое разочарование и резкий спад количества полётов к Марсу в последовавшие 20 лет, примерно до середины 90-х.

Выяснилось, что Марс -- место весьма гиблое и для жизни человека категорически непригодное. "Колонистов", ступивших на его поверхность, ожидала бы быстрая смерть из-за совокупности, как минимум, следующих факторов:

1. Крайне разреженная атмосфера, с давлением в 640 Па [примерно 1/150 земного]. Вода

в таких условиях кипит при температуре около  $+0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что много ниже температуры человеческого тела. То есть, без герметичного жёсткого скафандра, подобного лунному, у человека на Марсе мгновенно вскипит кровь [несколько читателей мне справедливо указали на неточность этого выражения. Полного кипения и ужасов как в "Вспомнить всё" действительно не будет, ибо кипение, даже начавшись, будет тут же остановлено избыточным давлением растягиваемых газом тканей (плюс, его может предотвратить артериальное/венозное давление в кровеносной системе человека). Но выделение каких-то газов из крови будет происходить почти гарантированно, вызывая нарушение кровообращения, эмболию и симптомы, близкие к кессонной болезни. Это невероятно болезненно и опасно для здоровья, и во всех практических смыслах атмосферное давление ниже примерно  $6.3\text{ кПа}$  губительно для человека]. Одного этого достаточно, чтобы оставить мысль о Марсе как о "втором доме", но я дополню картину ещё несколькими штрихами:



Image Credit: NASA [Hubble Space Telescope]

2. Практически полное отсутствие кислорода в атмосфере. Его там  $0.13\%$ .
3. Невозможность существования воды в жидком виде на Марсе как следствие #1. За крайне редкими исключениями, вода там бывает либо паром, либо льдом, и переход между ними осуществляется напрямую, минуя жидкую фазу. Это серьёзно подрывает возможность заселить Марс какими-нибудь, скажем, лишайниками.
4. Холодно. Обычная погода на Марсе -- это  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , с вариациями от  $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
5. Солнечная радиация. Атмосфера планеты тонка и пропускает до самой поверхности солнечное излучение с длинами волн от  $\sim 195\text{ нм}$ . Ультрафиолет такой жёсткости губителен для всякой земной жизни. Врачи не зря используют УФ-лампы для дезинфекции помещений.
6. Как следствие #5, поверхность Марса, вероятно, насыщена пероксидами, которые убьют всё живое, если вдруг там и появятся вода и жизнь.

Резюме: нынешний Марс действительно отменно стерилизован и к заселению совершенно непригоден. Технически, сегодня нам куда проще сохранить обитаемой Землю, нежели сделать таковым Марс. Для того же, чтобы люди могли разгуливать по нему в обычной кислородной маске и правильно подобранной одежде, нужно, как минимум, справиться с проблемой #1, то есть увеличить давление атмосферы.

О способах решения этой проблемы и пойдёт речь.

## Общие соображения

Прежде всего, каковы необходимые условия?

Давление паров воды при температуре +37 °C составляет около 6300 Па [0.062 атм]. Значит, чтобы ходить без скафандров, нужно как минимум 6300 Па. Правда, это ещё не учитывает потребности дыхания.

Чтобы дышать, хорошо тренированному человеку необходимо парциальное давление кислорода во вдыхаемой смеси не менее примерно 40 миллиметров ртутного столба, или 5300 Па. Добавляя к этому давление водяного пара из лёгких [6300 Па], получаем, что общее давление атмосферы (равное давлению газа в лёгких) должно составить около 11600 Па, или примерно 1/9 земной атмосферы. Это -- абсолютный минимум, при котором очень здоровый и тщательно подготовленный человек ещё сможет жить и работать, вдыхая чистый кислород из маски. На Земле эти условия наблюдаются на высоте примерно 18 км.

Итак, если каким-либо образом поднять давление марсианского "воздуха" в 18 раз (от 1/150 до 1/9 атмосферы), то по Марсу можно будет разгуливать без скафандров. Более плотная атмосфера, кстати, попутно смягчит проблемы за номерами 3, 4 и 5.

Второй важный вопрос после "что?" -- это "когда?". К какому числу и году должна быть представлена работа?

На бесконечности, очевидно, всё получается само собой и бесплатно. Ведь примерно через 4 миллиарда лет Солнце вступит в стадию красного гиганта, его светимость резко возрастёт, полярные льды на Марсе испарятся и создадут вполне достойную газовую оболочку. Без всяких усилий с нашей стороны. Только нам это уже будет без нужды.

Ну а когда оно ещё будет актуально? Если предположить, что скорость технического прогресса человечества в следующие века сохранится на уровне, хотя бы сопоставимом с нынешним, то, видимо, речь идёт лишь о нескольких сотнях лет. Просто потому, что цивилизация какого-нибудь 2500-го года от нас нынешних будет отличаться настолько, что бессмысленно пытаться понять её нужды сегодня, равно как и решать её проблемы современными "допотопными" средствами. Это будет всё равно что проектировать станцию "Мир" под сборку лопатами и кузнечными молотами.

Собственно, здесь становится очевидным другой способ, #2. А именно, если микроэлектроника и нанотехнология продолжают развиваться нынешними темпами, то через пару сотен лет люди смогут создавать себе искусственные тела, не боящиеся радиации, вакуума, не нуждающиеся в кислороде и вдобавок, возможно, и вовсе бессмертные. Носители этих тел легко смогут разгуливать без масок и скафандров хоть по Марсу, хоть по Плутону. Что, на мой взгляд, и будет наиболее быстрым и элегантным решением проблемы. Ведь нынешнее человеческое тело -- предмет до чрезвычайности малоприспособленный к космическим путешествиям. Системы

жизнеобеспечения и защиты, которые приходится таскать с ним в космос, на порядки усложняют любую межпланетную затею. Полёт с сегодняшними телами дальше Луны -- это пешая экспедиция медуз по Сахаре. Приспособление своего тела к условиям планеты, а не глобальное надругательство над её климатом, выглядит куда более правильным и естественным путём развития.

Но если нам так уж хочется, вот прямо так уж неётся добиться решения именно для тел нынешних, да ещё и в рамках знаний сегодняшних, то придётся задуматься об изменении климата Марса. Причём рассматривать нужно только такие программы, которые имеют шанс уложиться в несколько сотен лет. Для определённости возьмём 300. Чтобы наши далёкие предки, поставленные перед уже свершившимся фактом, могли лишь впясть нам посмертно срок "за разрушение уникальной экосферы Марса" :) Так что рассмотрим, какие же технические средства предоставляет природа для совершения этой "кражи со взломом".

### Решение #3 -- "разгон" атмосферы

Один, довольно общеизвестный, подход к проблеме заключается в следующем. Как известно, углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) обладает сильным парниковым эффектом. То есть, атмосфера, из него состоящая, согревает поверхность планеты, пропуская к ней солнечный свет, но блокируя уходящее тепловое излучение планеты.

Марсианский "воздух" весьма жидок, но на 96% состоит из углекислого газа. Этого уже хватает, чтобы сделать климат Марса на 4-5 градусов теплее по сравнению с ожидаемым излучательным равновесием. В полярных шапках Марса [в основном южной] хранится ещё немало этого газа. Что получится, если, скажем, взорвать там пару сотен водородных бомб, испарить часть  $\text{CO}_2$  и, таким образом, временно повысить плотность атмосферы? В принципе, можно ожидать, что это приведёт к усилению парникового эффекта и, как следствие, росту температуры. Которое, в свою очередь, вызовет новый виток испарения углекислого газа с полюсов, новый рост плотности и т.д. В итоге получаем плотную атмосферу, тепло и полное отсутствие полярных шапок. Благодарь.

К сожалению, метод этот, при всей его заманчивости, вряд ли сработает. Причин тому две.

Во-первых, нет гарантии, что в полярных шапках содержится достаточно углекислого газа, чтобы обеспечить требуемое давление.

Действительно, масса атмосферы с давлением  $p$  у планеты с радиусом  $R$  и силой тяжести  $g$  даётся выражением:

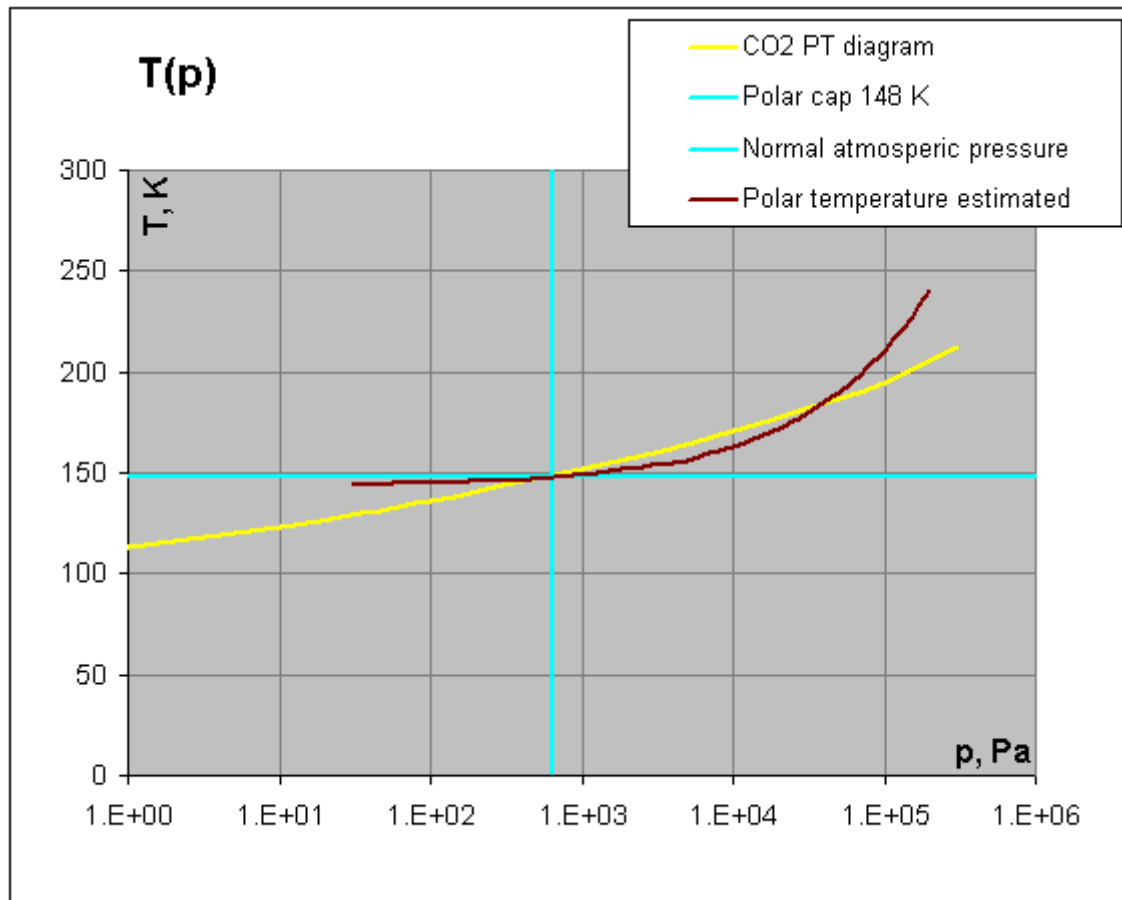
$$\frac{4\pi R^2 p}{g} \quad (1)$$

и для требуемых 11600 Па составляет около  $4 \cdot 10^{17}$  кг. Единства мнений по поводу массы твёрдого  $\text{CO}_2$  в полярных шапках сегодня нет; называемые

цифры разнятся от  $3 \cdot 10^{16}$  кг до  $4 \cdot 10^{17}$  кг. Если пессимисты правы, что более вероятно, то даже испарение всей углекислоты не создаст нужного давления и это направление бесперспективно.

Ну а если правы оптимисты, и газа там всё-таки достаточно, будет ли это работать? К сожалению, скорее всего, по-прежнему нет, и вот почему.

Взгляните на



приведённую картинку. Жёлтым цветом на ней обозначена температура испарения углекислого газа из твёрдой фазы ("сухого льда") как функция давления газа CO<sub>2</sub> над этим льдом.

Перекрестие голубых линий обозначает условия на южной полярной шапке [148 °K, 636 Па]. Как нетрудно заметить, это перекрестие лежит на жёлтой кривой. О чём это говорит? Правильно! О том, что марсианская атмосфера -- буферная, и поддерживается исключительно равновесием между паром и льдом CO<sub>2</sub> на южной полярной шапке.

Это равновесие должно обладать некоторым запасом устойчивости. То есть, когда в силу случайных причин в атмосфере вдруг становится больше углекислоты, её конденсация усиливается из-за роста давления и возвращает атмосферу в равновесие. Усиление парникового эффекта и разогрев при этом оказываются недостаточными, чтобы скомпенсировать большую "смерзаемость" газа на шапке. Чтобы вывести эту систему из равновесия, надо выбросить в атмосферу много, очень много газа. Вопрос: сколько? Точного ответа я не знаю, но могу провести приблизительную оценку.

Начнём с того, что любая атмосфера согревает свою планету, независимо от газового состава. Сопутствующая этому характерная линейная зависимость температуры от высоты отчётливо прослеживается в тропосферах по крайней мере восьми планет в Солнечной Системе.

Для трёх тел с близкими освещённостями и ожидаемыми температурами, а именно, Венеры, Земли и Марса, величина согревания, вызванного атмосферой, уже измерена умными людьми и составляет примерно:

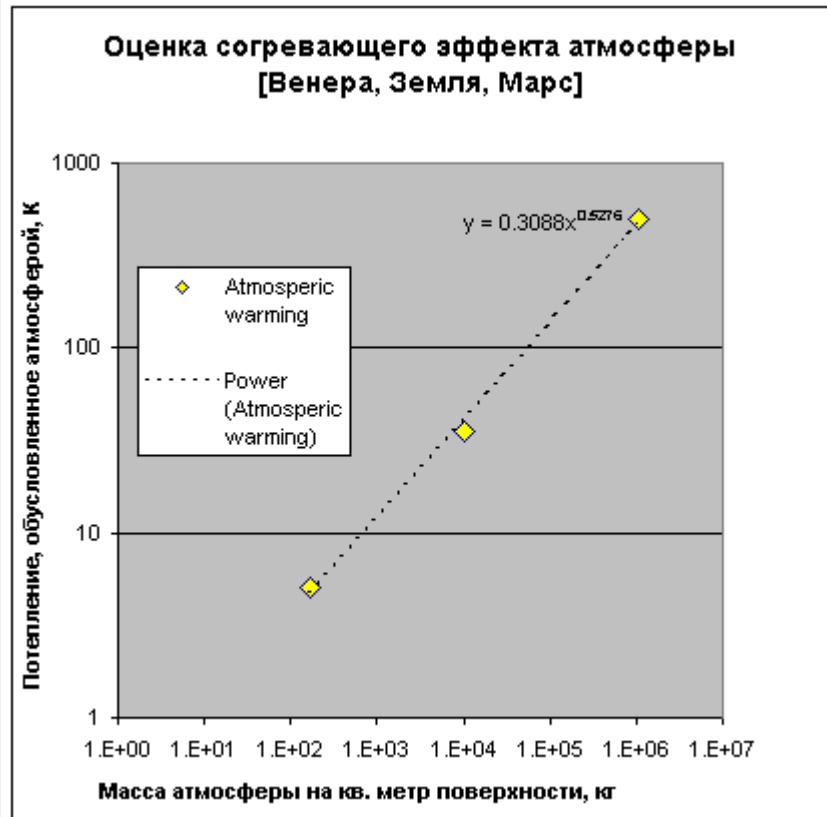
|        |       |
|--------|-------|
| Венера | 500 K |
| Земля  | 35 K  |
| Марс   | 5 K   |

Его график как функция массы атмосферы планеты на квадратный метр её поверхности ("толщины одеяла") изображён справа. Как видно, зависимость эта (пунктирная кривая) весьма проста, и позволяет оценивать количественно согревающий эффект атмосферы произвольной плотности. Знаю, настоящие специалисты за такое выгнали бы меня из класса. Но для грубой прикидки этот метод, как кажется, всё же должен работать.

Приняв "безатмосферную" равновесную температуру над южной полярной шапкой Марса за 143 °K, можно построить график этой температуры при различных давлениях атмосферы и посмотреть, где он

пересечётся с жёлтой кривой равновесия фаз углекислого газа. Справа от этой точки пересечения атмосфера будет "тёплой" и самоподдерживающейся за счёт парникового эффекта. Слева -- сваливаться к нынешнему разреженному и холодному состоянию.

Как вы, наверное, догадались, эта кривая уже отложена тёмно-красным цветом на первом графике. Искомая точка пересечения, согласно используемому методу, приходится на параметры 40 кПа и 184 °K. Это давление примерно в 60 раз выше сегодняшнего марсианского. Потребная для его создания масса газа, как нетрудно подсчитать, составляет около  $1.5 \cdot 10^{18}$  кг. Это многократно превосходит даже самые оптимистичные оценки его запасов в полярных шапках. Так что, даже если из-за грубости используемого метода я и ошибся раза в три, на этой затее всё равно придётся поставить жирный крест.





В заключение отмечу, что все вышеприведённые рассуждения отнюдь не являются моим открытием, но есть грубая иллюстрация "на пальцах" фактов, довольно хорошо известных в кругах науки о Марсе. Расчёты, проведённые настоящими специалистами, показывают, что конденсация  $\text{CO}_2$  при повышении его давления будет происходить не столько даже на шапке, сколько в верхней атмосфере, в виде облаков. Поэтому возникшая была мысль покрасить шапку в чёрный цвет и таким образом подогреть её к успеху, к сожалению, тоже не приведёт.

Описанная картина согласуется с современными представлениями о геологической истории Марса.

В далёком прошлом планета была очень активна. Её вулканы извергали много газов с сильным парниковым эффектом, в частности, таких, как сернистый газ  $\text{SO}_2$ . Эти добавки, вероятно, и согревали планету настолько, чтобы поддерживать достойную углекислотную атмосферу и даже реки из жидкой воды, русла которых сохранились на Марсе.

Потом вулканизм иссяк. Сернистый газ, как вещество химически довольно активное, быстро связался с поверхностью, перейдя в минералы. Похолодало. Парникового эффекта от оставшегося углекислого газа перестало хватать для поддержания нужной температуры. Возможно, тут ещё "помогло" разрушение  $\text{CO}_2$  солнечным ультрафиолетом или лёгкое изменение параметров орбиты Марса. Возникла полярная шапка, давление упало ещё ниже, процесс смерзания атмосферы покатился под горку, и вот мы видим сегодняшний Марс, холодный и безнадежно мёртвый.

Да, Марс мёртв, и куда более, чем нам того бы хотелось. Простым "толчком" его не разогреть. Если мы всё ещё не думаем отказываться от этой затеи, надо искать другие способы.

## **Решение #4 -- преобразование атмосферы**

Если невозможно создать подходящую атмосферу из  $\text{CO}_2$  то, может, удастся сделать это из других газов? Скажем, из приятного нам кислорода? Напрашивается мысль заселить Марс какими-нибудь лишайниками. Пусть они потребляют углекислый газ и делают из него кислород. По прошествии  $N$  лет получаем не планету -- санаторий!

Но даже если забыть, что в полярных шапках, вероятно, слишком мало  $\text{CO}_2$  для такого дела, план этот всё равно нереален. Да, некоторые лишайники способны перетерпеть пару недель в открытом космосе. Но одно дело -- найти существо, которое не очоурится после месяца на Марсе, и совсем другое -- добиться, чтобы оно там себя вольготно чувствовало, жило, размножалось, да ещё и производило кислород нам на радость. Учитывая отсутствие воды и постоянную ультрафиолетовую дезинфекцию поверхности, это кажется невыполнимым. Просто потому, что все земные существа созданы из вещества, не переносящего таких воздействий. Как их друг с другом ни скрещивай.

Нет, какие-нибудь экстремальные вариации, наверное, по-прежнему возможны. Можно, скажем, заселить примитивными хемосинтетиками не поверхность, а недра Марса. Собственно, если на Марсе и есть своя жизнь, то это, пожалуй, единственный мыслимый способ её существования. Но я, к сожалению, не настолько силён в биологии, чтобы рассуждать об этом даже поверхностно. Пусть выскажутся специалисты; я же отставляю этот путь как чересчур фантастический в рамках моих познаний.

И тем не менее, интересное решение на этом направлении есть. Ведь в чём основная проблема с теми же лишайниками? Да в том, что всё живое на Марсе слишком быстродохнет. Ну так а обязательно ли с этим бороться? Нужно ли, чтобы преобразователи атмосферы были биологически живыми? Вовсе нет. "Мёртвые" автоматы вполне способны справляться с подобной работой :)

Идея, собственно, не нова и не моя. Представим себе завод, непрерывно выполняющий всего лишь две функции: производить кислород из подножных минералов и... свои копии. А энергию брать от Солнца.

Если забросить на Марс десяток таких "заводов", то за какое-то время, размножаясь, они "заселят" всю планету, а потом наделают кислорода столько, что можно будет ходить по Марсу вообще без всяких масок. Затея выглядит хоть и сложной, но в принципе осуществимой. Единственное, что остаётся понять -- а можно ли её повернуть за предлагаемые 300 лет. Проведём оценки.

Пусть характерный размер "завода" будет  $a$ , его плотность --  $\rho$ , а затраты энергии на производство одного килограмма "завода" --  $q$ . Эти затраты, кстати, в основном состоят в выделении металла/кремния из минералов поверхности Марса и, следовательно, по порядку величины равны затратам на производство килограмма кислорода.

Обозначим КПД преобразования солнечной энергии в "заводы" за  $\eta$ , усреднённую за сутки мощность солнечного излучения на кв. метр за  $\Phi$ , а радиус Марса за  $R$ .

Если принять, что площадь солнечных батарей "завода" по порядку величины -- примерно  $a^2$ , то характерное время, за которое один завод произведёт свою копию составит, как нетрудно убедиться:

$$\tau \cong \frac{a \rho q}{\Phi \eta}$$

Это -- время удвоения "популяции" заводов. Удваиваться им придётся до тех пор, пока они либо не покроют собою весь Марс, либо не создадут нужную нам кислородную атмосферу, масса которой оценивается по формуле (1). Что случится раньше, определяется размером заводов.

Избавлю читателей от простых, но довольно нудных выкладок, и сразу выпишу ответ, показывающий, сколько времени займёт эта работа:



$$T = \begin{cases} T_0 & \text{при } a > a^*, \\ T_0 + \frac{q\rho}{\Phi\eta} [a^* - a] & \text{при } a < a^* \end{cases}$$

где

$$T_0 = \frac{a\rho q}{\Phi\eta} \operatorname{Ln} \left[ 2\pi \left( \frac{R}{a} \right)^2 \right],$$

$$a^* \cong \frac{2\rho}{\rho g}$$

Характерный вид этой функции представлен на рисунке. Важными её свойствами являются монотонность [при разумных  $a$ ] и выход на константу при малых значениях  $a$ . Как нетрудно показать, величина этой константы составляет:

$$T_{\lim} = \frac{2\rho q}{\Phi\eta g}$$

Подставим в неё цифры:

$q = 2 \cdot 10^7$  Дж/кг [порядка теплоты сгорания алюминия]

$\eta = 10\%$  [оптимистичная оценка, вытекающая из КПД лучших солнечных батарей, помноженного на КПД высокотемпературного технологического процесса]

$\Phi = 100$  Вт/м<sup>2</sup> [усреднённая за сутки и по широтам величина]

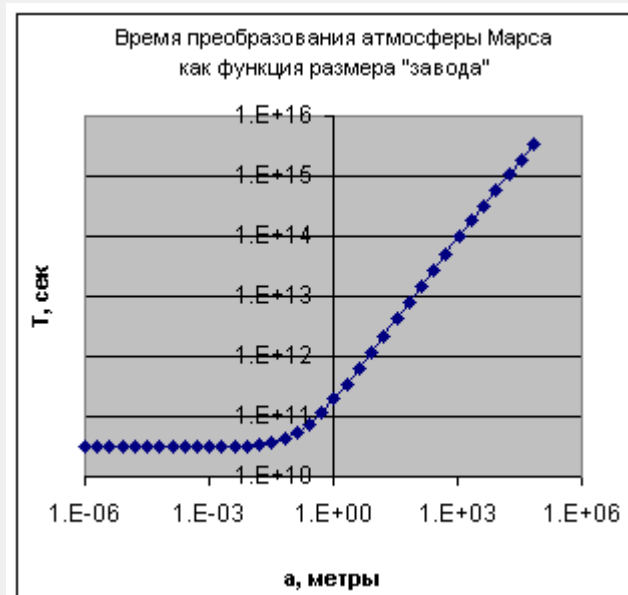
$\rho = 11600$  Па

$g = 3.7$  м/с<sup>2</sup>

Получаем ответ:  $1.2 \cdot 10^{10}$  секунд, или 400 лет. Это уже "тепло"!

Можно ли добиться более быстрого преобразования? Скорее всего, да. Во-первых, оценка очень груба. Во-вторых, значения  $q$  и  $\eta$  взяты довольно-таки "с потолка". Другая их комбинация, либо некоторое улучшение за счёт технического прогресса вполне способны дать лучшие результаты.

Вывод: глобальное преобразование атмосферы Марса саморазмножающимися "заводами" по производству кислорода в принципе возможно и может быть



завершено за несколько сотен лет. Необходимый для этого уровень технического развития не сильно опережает сегодняшний.

## Локальные решения

До сих пор мы рассматривали исключительно методы, затрагивающие всю планету. Вопрос: а можно ли решить задачу быстрее и проще, если потребовать соблюдения "приличного климата" лишь на какой-то небольшой части Марса?

Ответ положительный. Можно представить себе как минимум два интересных способа.

**Первый.** Давление марсианской атмосферы падает с высотой в  $e$  раз на каждые 11 километров, а температура -- на 2.5 градуса на километр. Соответственно, если закапываться в шахту, то воздух, наоборот, будет становиться теплее и гуще с той же скоростью.

Несложный расчёт показывает, что искомое давление в 11600 Па будет достигаться на глубине примерно 32 километра. Средняя же температура на этом уровне составит около +30 °C.

Итак, что мы делаем? Мы выкапываем здоровенную яму глубиной в 35 километров, и спокойно в ней селимся. Прямо под открытым марсианским небом.

Разумеется, площадь такой ямы не сможет превышать примерно 1/10 площади планеты, иначе имеющегося в атмосфере углекислого газа не хватит на заполнение сего дивного "корыта". И даже если хватит, намного больше всё равно не выкопаешь, потому как этот трюк работает лишь до тех пор, куда основная часть поверхности Марса находится на своём обычном "уровне моря", так что атмосфере есть откуда "стекать" в нашу яму.

Таким образом, максимальная площадь подобного поселения вряд ли может превышать 20 миллионов квадратных километров, что сопоставимо с площадью России.

Даже без учёта неизбежных технологических потерь энергия, необходимая на вынимание этого объёма грунта, составляет около  $8 \cdot 10^{25}$  Дж. Сегодня в год человечество производит около  $4 \cdot 10^{20}$  Дж, удваивая эту цифру приблизительно каждые 30 лет. Вывод: слишком энергоёмко по сегодняшним меркам, и останется таковым ещё лет 500. Так что забудем пока об этом, если только не вести речь про совсем уж крошечные поселения.

**Второй.** Зачем создавать давление газом? Ведь можно воспользоваться жидкостью. План такой. Выкапываем котлован. Не очень глубокий, метров 10. Заливаем его самой обыкновенной водой, а поверх неё пускаем пару метров какого-нибудь масла, которое не испаряется и не сильно разрушается в марсианских условиях. Масло создаёт давление на поверхности воды, нужное, чтобы она не кипела; вода же создаёт давление на дне, достаточное, чтобы

выращивать там растения и даже разгуливать в маске. Точнее, в лёгком акваланге :)

Здесь, конечно, тоже есть немалые трудности. Например, как сделать, чтобы эта вода не впиталась вся нафиг в грунт, или не замёрзла марсианской зимой? Как произвести на месте столько воды и масла? Но при должном напряжении инженерной мысли эти проблемы, думаю, должны решаться. Я лично считаю, что для создания небольших поселений-городков подобный подход оптимален, причём не только на Марсе.

Занятно, что в феврале 2006 г. НАСА объявило конкурс на сбор безумных идей по вопросу "а как нам лучше исследовать космос в следующие полвека?" Но, увы, оказалось, что эту мою идею к рассмотрению они принимать не могут, так как я, во-первых, ленюсь заполнять тонны формальных документов, а во-вторых, не являюсь исследовательским учреждением и не могу самостоятельно провести широкомасштабное исследование её применимости. Так что, чтобы мысль не пропала совсем впустую, дарю её общественности. Может, кто и доведёт чего до ума.

## Энергоёмкие решения

Почти каждый из рассмотренных вариантов можно существенно ускорить или улучшить, если обладать хорошим запасом лишних киловаттов.

Так, если утыкать Марс атомными реакторами, ежегодно производящими  $3 \cdot 10^{23}$  Дж энергии ( $10^{16}$  ватт), то среднюю температуру на Марсе можно будет поднять градусов на 25 и добиться устойчиво плотной атмосферы вне зависимости от того, что там о себе думает парниковый эффект.

Поставляя энергию для "заводов" в виде микроволнового излучения через ретранслятор с реакторов мощностью те же  $3 \cdot 10^{23}$  Дж в год, можно преобразовать всю марсианскую атмосферу примерно за 30 лет.

К сожалению, эти мощности сегодня на много порядков превосходят содержимое "энергетических кошельков" человечества, поэтому думать о подобных проектах нам пока противопоказано. Это ещё раз подчёркивает тот факт, что сама постановка задачи о колонизации Марса преждевременна.

## Незамкнутые решения

Как справедливо отметил г-н [mixalych](#), выше рассматривались только решения, опирающиеся исключительно на доступные на Марсе ресурсы. Но, используя энергию и вещество из источников вне планеты, можно построить ряд альтернативных стратегий.

Глубокий анализ этих альтернатив выходит за пределы того, что можно втиснуть в эту "статью". Но один, наиболее очевидный сценарий, допускает быстрое количественное рассмотрение. В этом сценарии речь идёт о сбросе на

Марс крупного астероида или кометы из, например, пояса Койпера, с целью разогрева и уплотнения атмосферы Марса. Покажем, что на сегодня этот путь, к сожалению, находится едва ли на грани выполнимого.

Во-первых, для начала надо оставить надежду **разогреть** Марс за счёт тепловыделения от падения кометы. Температуры, до которых нагревается вещество в ходе такого события, составляют сотни и тысячи градусов. В этих условиях львиная доля выделившейся энергии в считанные минуты уйдёт в космос в виде излучения.

Но вот источником вещества падение астероида послужить может. Если в нём найдётся значительное количество льда какого-либо достаточно тяжёлого летучего газа, этот газ может остаться в атмосфере и повысить её плотность до необходимого уровня.

В природе не так уж и много газов, наличия которых в серьёзных количествах можно ожидать на койперовских телах. Собственно, их, пожалуй, можно даже перечислить: метан  $\text{CH}_4$ , аммиак  $\text{NH}_3$ , вода  $\text{H}_2\text{O}$ , азот  $\text{N}_2$ , и, вероятно, угарный и углекислый газы  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ . Из указанных веществ наиболее притягательным выглядит твёрдый азот, который, кстати, даже наблюдается на поверхности Тритона. Сделаем ставку на этот газ.

Как уже было указано, для создания нужного давления необходима масса атмосферы в  $4 \cdot 10^{17}$  кг. Учитывая неизбежные потери газа при транспортировке и входе в атмосферу, нужное количество азота должно составлять, наверное, не менее  $10^{18}$  кг. Далее, распространённость азота в солнечной системе примерно на порядок ниже, чем кислорода. То есть, если мы найдём ледяной астероид, азота в нём окажется, вероятно, процентов 10. Но для простоты допустим, однако, что нам невероятно повезло и мы обнаружили цельный кусок замёрзшего азота указанной массы. Характерный размер такого тела будет составлять, кстати, километров 60, что, вообще говоря, довольно немало.

Это тело нужно будет доставить на Марс посредством коррекции его орбиты. Наиболее энергетически дешёвым способом такой коррекции будет "остановка" кометы в нужный момент и затем ожидание её падения на Марс. Чем дальше от Солнца комета, тем меньше её скорость и тем проще её остановить и направить. С другой стороны, ограничение на время операции (300 лет) требует, чтобы тело находилось не далее примерно 140 а.е. от Солнца, иначе оно не успеет прибыть к Марсу за 300 лет. Примем 140 единиц за базовое расстояние.

Скорость движения тел вокруг Солнца на таком удалении от него составляет около 2.5 км/с. Эту скорость надо погасить. Отсюда, и из массы астероида, вытекает величина потребной на это энергии:  $3 \cdot 10^{24}$  Дж. Это примерно на 4 порядка выше, чем ежегодно производимая ныне человечеством энергия. То есть, о данном направлении тоже можно забыть примерно на следующие 400 лет.

Вышеприведённые оценки **не** означают, что использование внешних источников бесперспективно. Но они показывают, что, по крайней мере, в

наиболее прямолинейной реализации это действительно не помогает разрешить проблему.

Возможные обходные пути на этом направлении -- это: а) найти маленький астероид с газами, обладающими колоссальным парниковым эффектом [непонятно, насколько это фантастично]; б) растянуть коррекцию орбиты кометы на несколько сотен лет с тем, чтобы уложиться в доступный энергетический бюджет. Хотя суммарные затраты энергии при этом, как минимум, удвоятся, их распределение по времени может сделать проект потенциально осуществимым уже через 200-300 лет.

## Суперпарниковые решения

Через относительно недавних открытий (после 2007-го года, когда писалась эта статья) указывает на ещё одну возможность, в настоящий момент скорее фантастическую, но всё же разумную. Дело в том, что некоторые газы обладают колоссальной способностью поглощать инфракрасное излучение и создавать парниковый эффект, превосходя по этому параметру углекислый газ на многие порядки. Теоретически, если поставить на Марс завод, который будет производить подобный газ и выбрасывать его в атмосферу, её температуру можно поднять. Практически всё будет определяться необходимой скоростью производства этого газа, которая зависит от неизвестной его парниковой эффективности в марсианских условиях, и ещё более неизвестного времени разрушения в атмосфере красной планеты. Расчёт этого пути я оставляю интересующимся в качестве ~~домашнего~~ ~~упражнения~~ неплохой курсовой работы по физике. Если у меня когда-нибудь дойдут руки, сосчитаю сам. Пока же ограничусь лишь упоминанием вот такой забавной потенциальной возможности, без каких-либо конкретных выводов.

## Заключение

При современном развитии технологий и в рамках имеющихся у меня знаний наиболее перспективными методами колонизации Марса выглядят, примерно в порядке предпочтительности:

1. Изменение природы человеческого тела с тем, чтобы марсианская среда не была для него губительной.
2. Преобразование состава атмосферы путём "заселения" Марса самовоспроизводящимися "заводами" по производству кислорода из оксидов в марсианском грунте.
3. Создание "заселённых водоёмов".

## Литература

Или, точнее, просто список полезных или интересных книжек:

1. ред. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины. Справочник. Москва, Энергоатомиздат, 1991.
2. Katharina Lodders and Bruce Fegley, Jr. The Planetary Scientist's Companion. New York, Oxford, Oxford University Press, 1998.
3. Маров М.Я. Планеты Солнечной Системы. Москва, Наука, 1986.
4. Кондратьев К.Я. Планета Марс. Ленинград, Гидрометеиздат, 1990. Тираж у этой книжки, кстати, всего 900 с чем-то экземпляров...
5. Доул С. Планеты для людей. Пер. с английского. Москва, Наука, 1974.
6. Ксанфомалити Л.В. Планета Венера. Москва, Наука, 1985.
7. George H. A. Cole, Michael M. Woolfson. Planetary Science. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2002.

Плюс различные НАСовские странички с результатами более свежих исследований, записывать адреса которых мне было просто лень.

25.06.2006 [updated 16.07.2006]

Ссылка на статью в ЖЖ и её обсуждение: <http://eugenebo.livejournal.com/63366.html>

===

**Text Author(s):** Eugene Bobukh   ===   Web is volatile. Files are permanent. **Get a copy:** [[PDE](#)] [[Zipped HTML](#)]   ===   **Full list of texts:** <http://tung-sten.no-ip.com/Shelf/All.htm>]   ===   **All texts as a Zip archive:** <http://tung-sten.no-ip.com/Shelf/All.zip>] [mirror: <https://1drv.ms/u/s!AhyC4Qz62r5BhO9Xopn1yxWMSxtaOQ?e=b1KSii>]   ===   **Contact the author:** h o t m a i l (switch name and domain) e u g e n e b o (dot) c o m   ===   **Support the author:** 1. **PayPal** to the address above; 2. **BTC:** 1DAptzi8J5qCaM45DueYXmAuiyGPG3pLbT; 3. **ETH:** 0xbDf6F8969674D05cb46ec75397a4F3B8581d8491; 4. **LTC:** LKtdnrau7Eb8wbRERasvJst6qGvTDPbHcN; 5. **XRP:** ranvPv13zqmUsQPgazwKkWCEaYecjYxN7z   ===   **Visit other outlets:** Telegram channel <http://t.me/eugeneboList>, my site [www.bobukh.com](http://www.bobukh.com), Habr <https://habr.com/ru/users/eugenebo/posts/>, Medium <https://eugenebo.medium.com/>, Wordpress <http://eugenebo.wordpress.com/>, LinkedIn <https://www.linkedin.com/in/eugenebo>, ЖЖ <https://eugenebo.livejournal.com>, Facebook <https://www.facebook.com/EugeneBo>, SteemIt <https://steemit.com/@eugenebo>, MSDN Blog [https://docs.microsoft.com/en-us/archive/blogs/eugene\\_bobukh/](https://docs.microsoft.com/en-us/archive/blogs/eugene_bobukh/)   ===   **License:** Creative Commons BY-NC (no commercial use, retain this footer and attribute the author; otherwise, use as you want);   ===   **RSA Public Key Token:** 33eda1770f509534.   ===   **Contact info** relevant as of 7/15/2022.

===