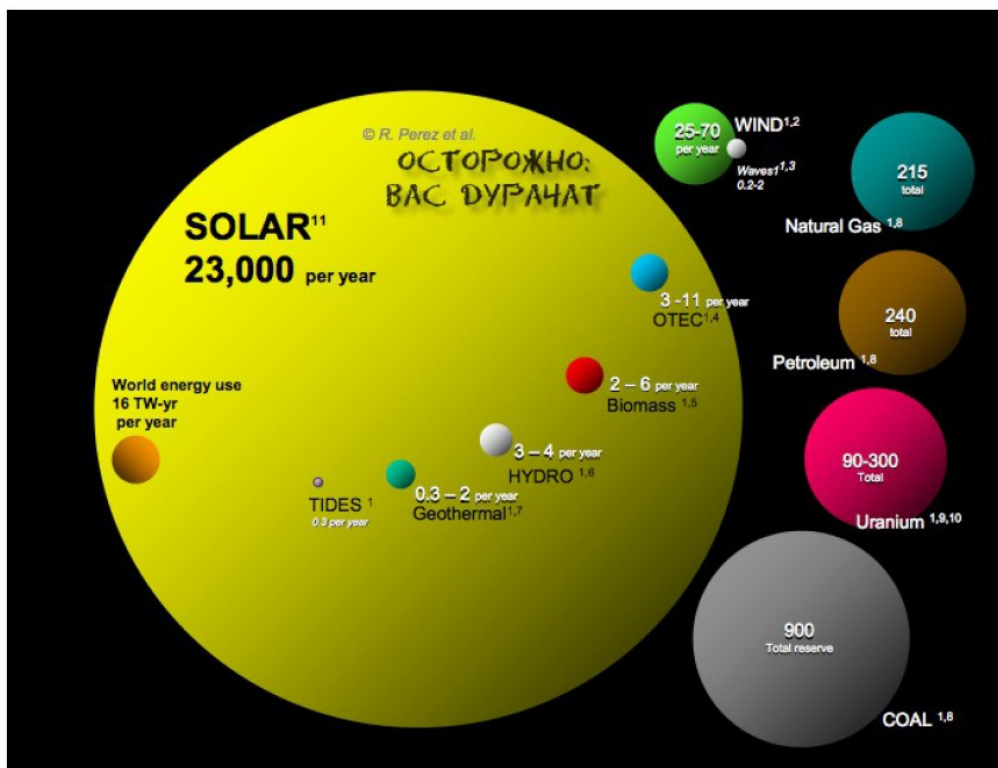


Глава 2. Земля как термодинамическая машина.

– Как-нибудь, – сказал Патрик. – Хотя бы подключения... Мы совсем потерялись. Я тебе объясню сейчас. Сегодня в институте послали к Земле массу... Впрочем, это ты все знаешь. – Патрик помахал перед лицом растопыренными пальцами. – Мы ждали Волну большой мощности, а регистрируется какой-то жиденький фонтанчик. Понимаешь, в чем соль? Жиденький такой фонтанчик... Фонтанчик...

А. и Б. Стругацкие «Далёкая радуга»

Внезапно, два Переца, Ричард и Марк (отец и сын, вроде бы) в статье «Фундаментальный взгляд на энергетические запасы Земли» нам предлагают поглядеть весёлую картинку[9].



Ничего «фундаментального» в статейке у перцев нету. Ссылаясь на разные, в том числе очень годные источники, нам нарисовали 13 шариков, и каждый соответствует какому-нибудь типу энергии.

Цивилизация планеты Земля, по мнению Перецев, в 2009 году потребляла 16 тераватт-лет¹¹ энергии. Ссылку не приводят, так что, наверное, – вычислено авторами. В более привычных единицах, на каждого из семи миллиардов жителей Земли приходится по 55 кВт·ч в день, или 2.3 кВт мгновенной тепловой мощности – оказывается, каждый землянин может непрерывно кипятить электрочайник. Суммарные запасы природного газа, нефти, урана-235 и каменного угля в земной коре срисованы у «Бритиш Петролеум» [10] – 1'445 тераватт-лет, то есть, при потреблении 2009 года – хватит лет на 90. Не надо паниковать, говорят авторы. Видите, сколько мы можем получить от Солнца? 23'000 тераватт ежегодно! А ещё есть же: ветер! Волны! Приливная энергия! Нет проблем.

Энергии на планете Земля – завались! В этой главе очень часто придётся употреблять тераватты и ставить десятки в крутые степени. Начнём рассматривать шарики.

Нам говорят: от приливов, можно получить мощность 0.3 ТВт. Земля вращается вокруг своей оси, делая один оборот за 86'164.1 секунды. От влияния Луны и Солнца вращение Земли замедляется приблизительно на 1.6-1.8 миллисекунд каждые сто лет. Кинетическую энергию Земли можно прикинуть по формуле для шара равномерной плотности:

$$E_{\text{вращения}} = \frac{2 M_{\text{земли}} R_{\text{земли}}^2}{5} \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{t_{\text{суток}}} \right)^2$$

Масса планеты Земля приблизительно $5.972 \cdot 10^{24}$ кг, средний радиус $6.371 \cdot 10^6$ м. Получается огромное число: $2.6 \cdot 10^{29}$ Дж. На самом деле момент инерции Земли несколько меньше, так как масса сосредоточена вблизи ядра. Более точные подсчеты проведены К. Ламберком и Ф.Д. Стейси в восьмидесятые годы прошлого века: $2.14 \cdot 10^{29}$ Дж. Вычислим мощность:

$$W = \frac{\Delta E}{t_{\text{год}}} = \frac{2 M_{\text{земли}} R_{\text{земли}}^2}{5 t_{\text{год}}} \frac{1}{2} (2\pi)^2 \left[\frac{1}{t_{\text{суток}}^2} - \frac{1}{(t_{\text{суток}} + \Delta t)^2} \right] \approx \frac{2 E_{\text{вращения}} \Delta t}{t_{\text{суток}} t_{\text{год}}}$$

Замедлению на 1.8 мс за 100 лет, то есть $\Delta t = 1.8 \cdot 10^{-5}$ секунды в год, соответствует ежегодное сокращение кинетической энергии Земли на $8.9 \cdot 10^{19}$ Дж/год, или мгновенная мощность 2.7 ± 0.1 ТВт. Площадь планеты $5.1 \cdot 10^8$ км², то есть на квадратный километр поверхности в среднем приходится 0.005 МВт приливной энергии. Здесь и далее, мы будем широко использовать это понятие: единиц энергии на квадратный километр. К несчастью, большинство приливной энергии рассеивается в мантии в виде тепла (это мы рассмотрим ниже). В виде непрерывно бегущей по Земле водяной «горки» остаётся около 10%.

¹¹ Повторимся, что речь идёт обо всей энергии, а не только электрической.

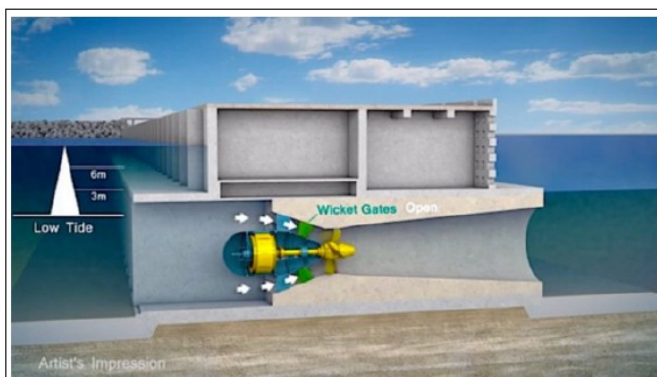
Можно ли собрать все 0.3 ТВт? Нельзя! Предположим, что вы подвесили груз массой один килограмм. Какова потенциальная энергия груза? Чтобы не решать зубодробительную задачу с тремя телами, ограничимся одной лишь Луной. Луна притягивает массу, и по формуле Ньютона легко прикинуть создаваемое ею ускорение свободного падения:

$$a_{\text{Луны}} = G \frac{M_{\text{Луны}}}{R_{\text{орбиты}}^2} = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{M_{\text{Луны}}}{R_{\text{орбиты}}^2}$$

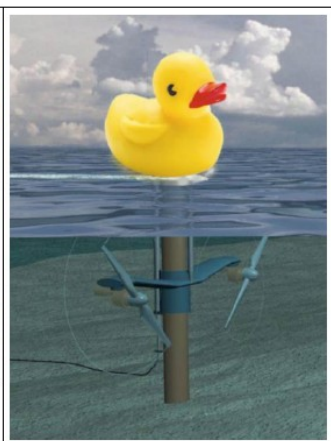
Масса Луны $7.348 \cdot 10^{22}$ кг, средний радиус орбиты $3.8 \cdot 10^8$ м. Итого, ускорение $3.4 \cdot 10^{-5}$ м/с² или $3.5 \cdot 10^{-6}$ от земного ускорения свободного падения g. Если опустить ваш килограмм на один метр, он совершит работу – выделит энергию. Если Луна у вас над головой, работы будет сделано чуть меньше, а если Луна на противоположной стороне Земли – чуть больше. Разница в произведённой работе определяет КПД системы:

$$\text{КПД} = \frac{E_{\text{high}} - E_{\text{low}}}{E_{\text{high}}} = \frac{m(g+a)h - m(g-a)h}{m(g+a)h} = \frac{2a}{g+a} \approx 2 \frac{a}{g}$$

Оказывается, просто подвесив груз, от приливных сил можно получить впечатляющий КПД: 0.0007%. Это, прямо скажем, немного. Но именно поэтому Земля замедляется на 1.8 мс в столетие, а не на секунду в год.



Представления художников о приливной энергии.



Есть и хорошие новости: в некоторых местах приливная «горка» морской воды встречается с сушей, и получается переток. Земля сама концентрирует энергию приливных сил в кинетическую энергию! В некоторых бухтах и устьях рек уровень воды поднимается на десяток метров дважды в сутки. Это не Луна воду поднимает, а кинетическая энергия приливной волны, накопленная на многих тысячах квадратных километров океана. В таких вот местах и можно строить приливные электростанции, как показано на картинке. Утёнок – шутка, но не выдумка. Огромного резинового утёнка запустили в

2009 году. Безумству «зелёных» нет предела.¹²

Водяные мельницы на приливной энергии строили ещё римляне. На сегодняшний день успехи приливной энергетики не особенно впечатляют. В мире есть полтора десятка мелких и экспериментальных станций и только две крупные коммерческие: Ранце во Франции (с 1966 года) и Озеро Сихва в Южной Корее (введена в строй в 2011 году). Суммарное производство приливной электроэнергии в мире – $1'100 \text{ ГВт} \cdot \text{ч/год}$, что соответствует средней мощности $1.25 \cdot 10^{-4} \text{ ТВт}$. В Южной Корее затеяли огромную приливную станцию в районе аэропорта Инчеон. Ввод в строй намечался в 2017 году, и тогда мировое производство приливной электроэнергии могло сразу утроится, однако в 2012 строительство заморозили. Великобритания пыталась строить станцию в заливе Сванси Бэй – примерно размером с Ранце или Сихва. На 2017 год построено менее 10% огромной плотины, когда введут в строй неизвестно. Все остальные крупные проекты – фантазии художников.



Термодинамика – штука неумолимая. Если облепить все моря-океаны турбинами, как показано выше, с фантастическим КПД 33% (что ни делай, часть воды всё-таки проскочит наши турбины), с планеты Земля удастся получить не более 0.1 ТВт. На приливной энергетике мы так подробно остановились, чтобы показать технологию обмана перцев. Число 0.3 ТВт – правильное, но это вся энергия – без учёта КПД и технической осуществимости миллиардов подводных турбин.

Продолжим по нашим шарикам. Следите за руками.

Второй практически вечный источник энергии на Земле – естественный радиоактивный распад. Радиоактивные вещества представлены главным образом двумя изотопами урана (235 и 238), торием-232 и калием-40,

¹² <http://thirstyinsuburbia.com/2009/12/best-of-2009-clean-renewable-rubber-ducky-power/>

остальные, вроде радия, являются короткоживущими продуктами распада главной четвёрки, и учитываются в общей энергии распада (энергией улетающих в космос нейтрино пренебрегаем). Концентрации изотопов на Земле приблизительно известны, как и время полураспада. Сколько именно килограммов распадается в год, подсчитаем по формуле:

$$M_{год} = M_0 \left(1 - 2^{-1/t_{полураспада}} \right)$$

Выделение энергии при естественном распаде приведено в таблице ниже.

Изотоп	Масса на Земле в настоящее время, кг	Естественный распад в год, кг	Энергия при полном распаде 1кг, Дж	Энергия естественного распада в год, Дж	Тепловая мощность, ТВт
²³⁸ U	8·10 ¹⁶	1.1·10 ⁷	2.1·10 ¹³	2.5·10 ²⁰	7.8
²³⁵ U	5·10 ¹⁴	5.4·10 ⁵	2.0·10 ¹³	0.1·10 ²⁰	0.3
²³² Th	3·10 ¹⁷	1.6·10 ⁷	1.8·10 ¹³	2.9·10 ²⁰	9.1
⁴⁰ K	8·10 ¹⁶	4.4·10 ⁷	3.2·10 ¹²	1.4·10 ²⁰	4.5
Всего:				6.9·10 ²⁰	22±5

Последний миллиард лет Земля потихоньку отдаёт через поверхность приблизительно 47±2 ТВт [11]. Таков внутренний баланс энергии: от радиоактивного распада и приливных сил¹³ получаем 24±6, а отдаём 47±2. То есть, в настоящую геологическую эпоху Земля слегка остывает. В любом случае, планетка продолжит отдавать через поверхность примерно 47 ТВт ещё полмиллиарда лет и более, и особо волноваться по этому поводу не стоит.

Площадь планеты 5.1·10⁸ км², то есть квадратный километр поверхности в среднем греет снизу 0.092 МВт тепловой энергии. Если бы тепло выделялось равномерно по всей поверхности, тоже было бы очень грустно. К счастью, земная кора не одинакова, и некоторые места, например, Исландия или Камчатка, отдают тепло куда быстрее. Именно там и можно использовать геотермальную энергию. По данным «*British Petroleum*», в 2016 году на планете Земля общая установленная мощность геотермальных станций 13.438 ГВт, или по 1.8 Вт электро-тепловой¹⁴ мощности на душу населения – потребление мобильного телефона. В абсолютных величинах по установленной мощности лидирует не Исландия, а США (3'596 МВт) и вулканические Филиппины (1'929 МВт) с Индонезией (1'590 МВт). Если пересчитать на душу населения, получится 11.1, 18.9 и 6.2 Вт соответственно. Маленькая Исландия лидирует в душевом потреблении: 2'000 Вт установленной мощности на душу.

Если по всей планете (включая океаны) пробурить сетку геотермальных скважин с шагом около 200 метров и аккуратно отбирать тепловую энергию,

13 Выше обсуждалось что около 90% энергии от приливных возмущений рассеивается в мантии.

14 Помимо электричества, геотермальная энергия используется для обогрева.

сколько тепла можно получить? Посчитаем КПД системы при использовании в качестве теплоносителя воды. Как глубоко придётся бурить? В разных местах по-разному. В Индонезии и на Камчатке можно найти участки, где порода имеет более 100°С прямо на поверхности. В большинстве мест, однако, геотермальный градиент порядка 3°С на 100 м, то есть глубина скважин должна быть около 4 км. Средняя температура воздуха вблизи поверхности Земли 14°С или 287°К. Жить как на Венере (средняя по больнице +460°С) или как на Марсе (-63°С) нам почему-то не хочется, значит, менять не будем. Вода кипит при 100°С, но можно несколько увеличить, подняв давление. Итого, максимальный тепловой КПД:

$$КПД = \frac{T_{high} - T_{low}}{T_{high}} = \frac{110^{\circ}}{287^{\circ} + 110^{\circ}} = 28.5 \quad \% \quad \{2.1\}$$

Больше 13 ТВт мощности из геотермальной энергии никак не выжать¹⁵, даже в фантастическом предположении о бурении скважин каждые 200 м, включая океаническое дно. Если же моря-океаны из программы бурения исключить, а бурить геотермальные лишь на суше (с Гималаями и Антарктикой) – получится всего 4 ТВт. Конечно, геотермальные скважины через каждые 200 м никто бурить не станет, а геотермалка так и останется уделом счастливых обладателей аномалий: от Исландии до Филиппин. Вероятно, минимальная оценка Перецев: 0.3 ТВт – несколько оптимистична.

Теперь поглядим, что в среднем греет сверху. Кроме Солнца, других серьёзных источников не наблюдается. Желаящие могут на досуге посчитать количество солнечной радиации, отражаемое к нам Луной, а также тепло далёких звёзд. Число, которым любят бросаться любители солнечной энергетики: $w_s = 1.362$ кВт на квадратный метр. Именно столько даёт нам в виде излучения Солнце на радиусе земной орбиты. По формуле:

$$W_{\text{Солнца}} = w_s \pi R_{\text{Земли}}^2$$

Считая радиус планеты 6'371 км, на всю Землю приходится 173'000 ТВт, а на квадратный километр поверхности – в среднем $\frac{1}{4} w_s$, или 340.4 МВт энергии¹⁶. Выходит, радиоактивный распад и приливные силы мы считали совершенно зря, потому как в энергетическом балансе планеты они занимают жалкие 0.03%, и их можно не учитывать.

Однако если на квадратный километр попадает 340 МВт, это не значит, что все эти мегаватты можно прямиком послать в розетку. Максимальный перепад температур на Земле от -91°С (182°К) зимой в Антарктиде до +56°С (329°К) летом в Сахаре. Предельный КПД термодинамической системы легко вычислить по формуле {2.1}:

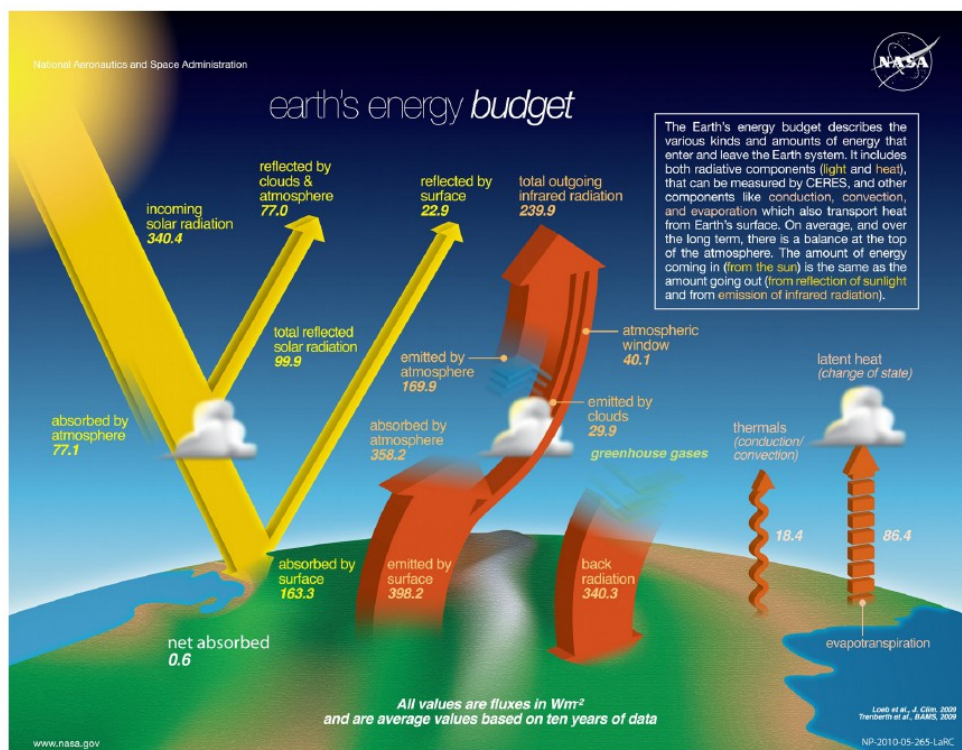
¹⁵ В комментариях встретилось, что можно якобы повысить КПД системы сверх максимального, используя фреон или подобные легкокипящие жидкости. Камарад недопонимает. Учите термодинамику!

¹⁶ Не забываем, что 1.362 кВт/м² – по нормали к солнечным лучам, а Земля – шар, да ещё и крутится.

$$КПД = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}} = \frac{329^{\circ} - 182^{\circ}}{329^{\circ}} = 45\%$$

Рассмотрим энергетический баланс Земли по версии NASA. Существуют и другие картинки, где циферки отличаются от этих на пару процентов, неважно.

От облаков и атмосферы отражается 77.0 МВт. Примерно 77.1 поглощается в верхних слоях атмосферы и переизлучается в виде тепловой радиации. Ещё 22.9 МВт отражается от поверхности. Итого, 52% лучистой энергии Солнца покидает окрестности Земли через миллисекунды после прибытия, так и не начав работать на человечество. Это на самом деле очень хорошо: атмосфера отражает или задерживает/переизлучает не только свет и тепло, но и вредные высокочастотные части солнечного спектра – рентген и ультрафиолет.



Можно ли увеличить предельный КПД планеты Земля? Конечно, можно. Для начала, посыпая всю сушу угольной пылью, а океаны заполняем зачернёнными пенопластовыми шариками. Двадцать два МВт получим дополнительно с каждого квадратного километра, а предельный КПД увеличится до 55%. В Антарктиде зимой слегка потеплеет: -60°C. Зато летом в Сахаре можно кипятить воду: ровно сто Цельсия.

Много ещё чего хорошего придумать можно. Разбрасывать с самолётов какую-нибудь химию – разгонять облака. Тогда на дневной стороне станет теплее, а

на ночной – холоднее. Вот вам и прибавка к КПД. Ах, если ещё и атмосферу убрать! Закачать весь воздух в баллоны! Жить, конечно, придётся в подземных убежищах, так как на поверхности условия станут лунными: температура на экваторе днём $+110^{\circ}\text{C}$, ночью -140°C , средняя -15°C , ну и про рентгены и ультрафиолет забывать не будем.

Может, не надо экспериментов? Во-первых, не знаю как вам, а мне в «Метро-2033» почему-то не хочется. Во-вторых, если на Земле не станет атмосферы, большая часть нашей естественной всепланетной энергетической машины поломаётся.

Итак, на квадратный километр прилетело 340.4 МВт, 52% тут же умчалось обратно в космос. 18.4 МВт превращаются в восходящие потоки воздуха. 86.4 МВт – уходит на испарение. Именно эти 104.8 МВт выполняют полезную работу. Вода выпадает где-то в виде дождя, собирается в ручейки и реки и куда-то течёт. Дует ветер. Разрушаются скалы, собирая золотишко в россыпные месторождения. И так далее.

А как же биомасса? На картинке она тоже есть: в среднем по планете $0.6\text{МВт}/\text{км}^2$ оседают в виде глюкозы, крахмала, белков, костной ткани, коралловых рифов и так далее. Эти мегаватты могут использоваться позже: иногда на полгода (мышка в норке хрюкает собранный летом урожай), иногда – на сотни миллионов лет (шахтёр в забое рубит уголёк). А могут и не использоваться: что в коралле, то пропало – извините за каламбур.

К сожалению, биологические процессы утилизации солнечной энергии не очень-то эффективны. Природа – не двигатель внутреннего сгорания, а в лучшем случае паровоз. Большинство зелёных растений имеет КПД по процессу «солнечный свет в сахар» менее 1%. Изрядное исключение – сахарный тростник. Растение-паразит научилось сосать из почвы все соки, зато добилось умопомрачительного КПД – до 6%. Собственно, оттого этот тростник и называется сахарным! По крахмалу соотношение примерно как у сахара (топинамбур лидирует), а вот по аминокислотам и белкам – менее 0.1%.

Тут мы глядим на огромный жёлтый шар: $23'000\text{ ТВт} = 23 \cdot 10^{15}\text{ Вт}$. Итак, на квадратный километр в среднем прилетело 340 МВт, из них 150 тут же отразилось от атмосферы, осталось 190. При фантастическом КПД солнечной батареи 30%, чтобы получить $23'000\text{ ТВт}$, нам понадобится $23 \cdot 10^{15} / 190 \cdot 10^6 / 0.3 = 4 \cdot 10^8\text{ км}^2$ солнечных панелей. Вся площадь планеты Земля (с океанами) – $5.1 \cdot 10^8\text{ км}^2$. Натурально, полюса солнечными батареями обкладывать не будем. Как-то так.

На деле, в 2016 году в мире выработано $333.1\text{ ТВт}\cdot\text{ч}$ солнечной электроэнергии, то есть мизерные 38 ГВт мгновенной мощности, по 5.1 Вт на душу (потребление портативного телевизора). В «солнечной» Германии на душу населения в год выработано $470\text{ кВт}\cdot\text{ч}$, в реально солнечных Испании и Австралии – 290 и 300 $\text{кВт}\cdot\text{ч}$ соответственно. В пересчёте на мгновенную

мощность 300 кВт·ч в год – 35 Вт, хватит для работы холодильника.

Если бы 7.5 миллиарда землян могли повесить солнечные батареи на каждую крышу, как в Германии, общее производство электроэнергии перевалило бы за 3'500 ТВт·ч в год, то есть мощность 0.40 ТВт. Про снег, короткие зимние дни и элементарное воровство обсуждать не будем, однако согласимся, что 0.40 ТВт с крыш – это не 23'000 ТВт с картинки наших перцев. Сколько нужно солнечных панелей, чтобы обеспечить каждому землянину комфортабельные 2 кВт электрической мощности? При фантастическом КПД 30% – $2'000/190/0.3 = 35$ квадратных метров. Реально – втрое или вчетверо больше. Большинство землян не могут позволить себе минимальные пять квадратов шифера над головой, а вы хотите – солнечные батареи?



«Ветер, ветер, ты могуч, ты гоняешь стаи туч, ты волнуешь сине море, всюду реешь на просторе, не боишься никого, кроме Перца моего...» На производство ветра и волн расходуется 18.4 МВт на квадратный километр, или по всей Земле 9'400ТВт. Вот бы захомутать всю эту энергию! Всю – не получится. Даже если обставить всю планету (включая океаны) ветряками, а на дирижаблях поднять огромные пропеллеры в стратосферу, следует учитывать КПД. Сто процентов КПД – это остановить движение атмосферы от слова совсем.

Перцы заявляют: можно добыть 25-75 ТВт. Отлично. Посчитаем. В 2016 выработано по всему миру 960 ТВт·ч, то есть мощность 0.11 ТВт. Самая ветряная страна мира, Германия (а не Голландия, как вы подумали,) застроила всю территорию (357 тыс км²) ветряками, потратив невероятное количество

евро и получив в 2016 году 77.4 ТВт·ч, по 108 Вт мгновенной мощности на каждого немца. Если распространить практику Германии по всей суше планеты, получится 3.7 ТВт. А если ещё в океане поставить башни через равные интервалы, да на них ветряки – целых 12.6 ТВт выйдет.

А сколько нам надо, чтобы получить 25 ТВт? Ветряк «Vestas V164» имеет высоту 220 м при размахе крыльев 164 м и электрической мощности 8 МВт. Конечно, на полной мощности штучка работает от силы 10% времени, значит в среднем 1 МВт. Какую площадь занимает ветряк? Сама башня – около 100 м². Жить в полукилометре не рекомендуется: лопасти, как дятел, долбят вам виртуальную дырку в думалке. Ночью пытаетесь заснуть, а стёкла дрожат: вушь... вушь... вушь... Однако площадь вполне можно использовать под сельское хозяйство (что и делается в Германии). Для того, чтобы обеспечить 25 ТВт мощности, как на весёлой картинке у перцев, потребуется двадцать пять миллионов башен «Vestas V164». На деревню с населением 290 человек – одна башня.



Ветряк «Vestas V164» и одна лопасть.



Вот великолепный шарик: гидроэнергетика. Построим на каждом ручейке по электростанции. Падающий с неба дождик будем улавливать и превращать в полезную энергию. Каждую секунду солнышко испаряет и переносит 16 млн тонн воды, затрачивая на это дело 44'000 ТВт мощности. Правда, большая часть осадков падает обратно, откуда испарилось. Суммарный сток с континентов в океаны 40'000 млрд тонн в год – 1.26 млн тонн в секунду. Средняя высота континентов – 840 метров над уровнем моря. Гидроэнергия стока огромна: $1.26 \cdot 10^9 \cdot 9.81 \cdot 840 = 10.4$ ТВт.

Перецы нарисовали нам 3-4 ТВт, то есть суммарный КПД гидростанций – 30-40%. Плотина на каждой луже. В реальном мире в 2016 выработано, по данным «BP», 4'022.9 ТВт·ч, то есть мощность 0.46 ТВт. Безусловно, потенциал у гидроэнергетики ещё есть, так как Амазонку пока плотинами перегородили недостаточно. Если выжать все осадки до последней капельки,

можно, наверное, получить и 1-1.5 ТВт, но вряд ли больше.

Тепловая энергия океанов – ОТЕС. Масса океанов – $1.35 \cdot 10^{21}$ кг, а для нагрева килограмма воды на один градус Цельсия требуется 4'120 Дж. Вообще, неплохая идея: опустить на глубину несколько километров холодильники, на поверхности – нагреватель. Аммиак или что-то вроде – в качестве теплоносителя. Если вы на острове, можно и просто качать из глубины холодную воду и использовать в домашних кондиционерах – экономим электроэнергию. Допустим, мы решились опутать весь океан трубами и поднимать среднюю температуру на один градус за сто лет. За год нельзя никак, а то океан закипит. Как там будут рыбы себя чувствовать – неважно. Итого, каждую секунду можно перекачивать $1.35 \cdot 10^{21} \cdot 4'120 / 100 / 365 / 24 / 3'600 = 1'760$ ТДж, то есть мощность 1'760 ТВт. А КПД? Средняя температура по больнице, как указывалось выше, 287°К, а максимальный перепад температур – около 10 градусов.

$$КПД = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}} = \frac{291^{\circ} - 281^{\circ}}{291^{\circ}} = 3.4 \%$$

Больше 60 ТВт никак не выжать. И для этого потребуется совсем немного теплоносителя. Удельная теплота парообразования аммиака – 1'370 кДж/кг. Каждую секунду наши компрессоры должны перекачивать «всего» 1.3 млн тонн. Для сравнения, это примерно секундный сток воды всех рек планеты Земля. Какой там реально будет КПД на многокилометровых трубах? Сколько миллиардов километров труб и теплообменников понадобится? Плотность полезной энергии несильно отличается от геотермальной: там 0.092 МВт/км² всей планеты, а у ОТЕС – 0.168 МВт/км², но только океанов.

Представьте, что вы – Дарт Вейдер из «Звёздных Войн», и в вашем распоряжении вся планета, а ресурсы как в каждой порядочной космоопере – неограниченные. К вам приходит инженер-планетоустроитель и начинает предлагать технологические решения, как добывать на Земле полезную энергию.

1. Для эффективности, откачать атмосферу. Людишек, естественно, в крематорий, чтоб не мучились. Не пойдёт? Ладно, не рассматриваем.
2. Биосферу в крематорий. Остеклим всю планету, кроме полюсов, солнечными батареями с КПД 30%. Тогда с планетки можно получить 23'000 тераватт мощности. Не пойдёт? Ладно.
3. Биосферу в крематорий. Обставим всю планету (включая океаны) – ветряками. Семьдесят миллионов башен. Вушь-вушь-вушь. Получим 70 тераватт мощности. Не пойдёт? Ладно.
4. Биосферу в крематорий. На каждом ручейке по электростанции. На дне моря – пропеллеры. Бурим геотермальные скважины через каждые

двести метров. Трубы с аммиаком – в море. Получим тераватт примерно 30, и уже хорошо. Не пойдёт?

Ну что же вы так: «Не пойдёт, не пойдёт...» Я же дело предлагаю. А? Что? Биосферу в крематорий? Так её не жалко совсем. Глупые людишки, дикие зверушки, деревья – дубы. Главное – энергия!

А кроме шуток. Сколько энергии Солнца реально потребляет человечество? Шестнадцать тераватт – перцы поторопились. Посчитали нефть, газ, уголь, ядерную энергию, возобновляемые источники, и всё. А как же еда, пресная вода и так далее? Попробуем посчитать правильно, только для 2016 года, а не для 2009.

Вид энергии	Потребление в 2016 году	Эквивалент солнечной мощности
Ископаемое углеродное сырьё (нефть, газ, уголь, торф)	11'354 млн т нефт. экв.	14.70 ТВт
Ядерная энергия ¹⁷	2'616.5 ТВт·ч (электрических)	1.00 ТВт
Возобновляемые «солнечные»: солнечная, ветровая, гидро, сжигание биомассы	5'877.1 ТВт·ч (электрических)	2.25 ТВт
Возобновляемые «земные»: геотермальная и приливная	114 ТВт·ч (тепловых)	Менее 0.01 ТВт
ИТОГО «технологической энергии»:		Около 18.0 ТВт
Пресная вода ¹⁸	4'250 млрд м ³	375 ТВт
Продукция сельского хозяйства и рыболовства	Не менее 13.96 млн км ² обрабатываемых сельхозугодий	Более 8.50 ТВт, вероятно до 35 ТВт
ИТОГО в виде пресной воды и продовольствия:		Более 382 ТВт
ВСЕГО:		Более 400 ТВт

Что удивительного в таблице? Оказывается, в виде пищи: белков, жиров, углеводов – человечество потребляет вероятно не меньше солнечной энергии, чем от нефти или каменного угля.

Поясним на примере. Норма продовольствия для взрослого человека 2'700 ккал или 11.3 МДж в сутки. Человек потребляет как 130-ваттная лампочка. Выше мы посчитали, что в среднем на квадратный километр площади падает 163.2 МВт, а на квадратный метр – 163.2 ватта солнечной энергии. Значит, чтобы прокормиться, вам надо всего 0.8 м² пахотной земли? Когда в Советском Союзе давали по шесть дачных соток на семью – наверное, были слишком

¹⁷ Для перевода в тепловую мощность принят КПД=30%. На самом деле, с учётом обогащения урана и утилизации отходов, КПД вероятно ниже.

¹⁸ Учитывается только вода, отобранная из водоёмов. Воды, выпавшей на поля в виде осадков, по-видимому, больше.

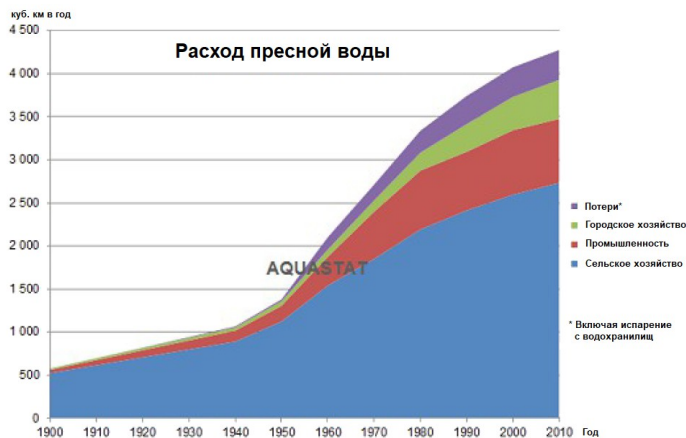
щедрыми.

Вы скажете: так считать нельзя? Хорошо, попробуем по-другому. Каждый квадратный метр земли в среднем захватывает 0.6 ватта (смотрите картинку NASA выше). Значит, чтобы прокормиться, человеку надо (в среднем) – 220м². Всё равно мало, но уже значительно ближе к истине. Дело в том, что человек волею судеб оказался на самой верхушке пищевой пирамиды, а жить-то хочется всем её участникам. Синтезировать пищу прямиком из тепла и электричества мы пока не умеем, а про КПД зелёных растений и прочей живности мы уже упоминали.

Взрослому человеку надо на год не менее 300 кг зерна (или корнеплодов) и как минимум 30 кг протеинов. Чтобы вырастить 30 кг мяса или птицы, надо примерно 180 кг зерновых или эквивалента. Итого: 480 кг пшенички в год – возьми да поднеси. При великолепной урожайности 3 тонны с гектара, в среднем по планете надо человеку 1'600 м² сельхозугодий¹⁹.

Реально, на 2013 год на Земле под пашню задействовано не менее 13.96 млн км², то есть по 1'940 квадратных метров (20 соток) на каждого жителя планеты. Оценка в 8.5 ТВт – минимальная, так как 0.6 МВт/км² – это в среднем по планете, а в Антарктиде почему-то не пашут. Пастбища не считаем. Ну и морепродукты мы не учитываем, хотя они – важнейший источник белков для двух миллиардов человек. Можно посчитать и по-другому. Исходя из 2'000 ккал в сутки (в среднем по планете людишки по-прежнему живут впроголодь), 7.5 млрд людей рассеивают мощность порядка 0.7 ТВт. Принимая КПД сельскохозяйственных организмов за 2% – потребляется 35 ТВт солнечной энергии. Так-то.

Но есть другая статья расходов, которая на порядок перекрывает всё остальное.



19 Обсуждать, что кто-то кушает 200 кг говядины в год, а у кого-то хроническая нехватка протеинов и слабоумие, – здесь не будем.

Пресная вода падает с неба и достаётся нам практически бесплатно. Доставляет её, естественно, Солнце, испаряя огромное количество воды (500'000 млрд тонн в год). Если уж перцы взялись считать солнечную энергию, оклеивая Землю солнечными батареями от полюса до полюса, не упоминать пресную воду нельзя, а то придётся отправить 7.5 млрд людишек... Ага.

Человек уже отнимает на свои нужды 11% мирового стока воды. Есть реки, которые до морей-океанов вообще не дотекают – 100% воды человек забирает на орошение. Оптимисты не сдаются и говорят: а мы бурим скважины и из-под земли воду качаем! Господа, а под землёй откуда пресная вода взялась? И что будет, когда выкачаете?

Значит, оставим на Земле всё как есть, но будем рачительно пользоваться. Где надо, поставим солнечные батареи, где можно – ветряки, на горных реках – непременно плотины. И биомассой – до последнего джоуля. Необязательно переводить всё в электроэнергию. Еда остаётся едой, пресная вода – пресной водой, а свободный кислород – кислородом. Сколько полезной энергии (в виде пищи и химических веществ, пресной воды, электроэнергии и так далее) можно срубить с планеты?

Термодинамика даёт приблизительный, но годный ответ. Основной «нагреватель» планеты Земля – дневная сторона, а основной «холодильник» – сторона ночная. Арктика и Антарктика – холодильники второстепенные. В космосе вакуум, оттого энергию можно отдавать исключительно в виде излучения. На полюсах холоднее, оттого и меньше отдают с единицы площади. В среднем перепад температур день-ночь на суше – 15 градусов, над океанами – 5, причём океанов больше. Есть и более тонкие расчёты, но в среднем получается 8 градусов. Средняя температура по больнице, как указывалось выше, 287°K.

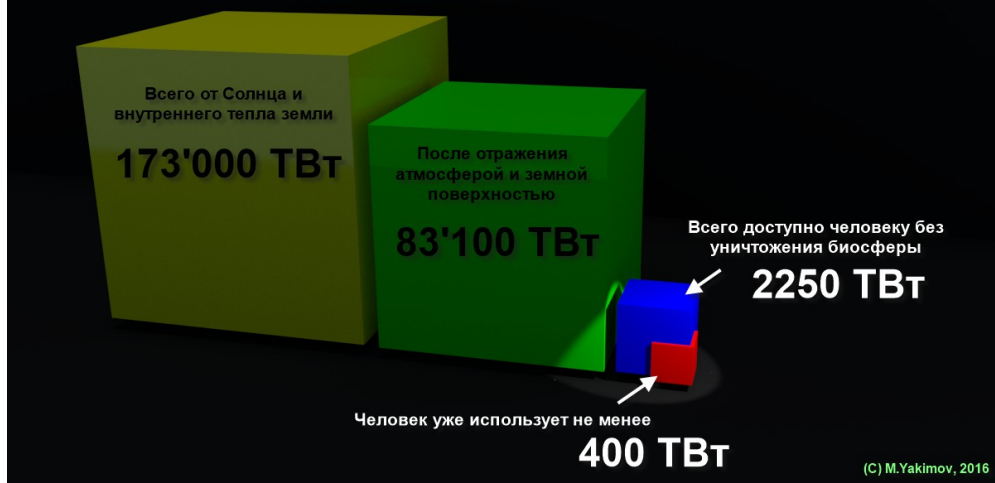
$$КПД = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}} = \frac{291^{\circ} - 283^{\circ}}{291^{\circ}} = 2.7 \%$$

Самым рачительным образом используя все до единого возобновляемые источники энергии, можно получить полезной $163.4 \cdot 10^6 \cdot 0.027 \cdot 5.1 \cdot 10^8 = 2'250$ ТВт. Если есть желание, можно сюда добавить десяток тераватт геотермальной энергии, и ещё капельку от приливной; роли это не играет. Ещё раз повторим: это не электроэнергия, а вообще вся полезная энергия, которую можно выжать с дарт-вейдеровским цинизмом, но не отправляя биосферу в крематорий.

Теперь, самое время порисовать графики. Чтобы не обвинили в плагиате, вместо шариков я буду рисовать кубики. Кубики и сравнивать легче.

Хотя на Землю от Солнца прилетает 173'000 ТВт энергии, за пару миллисекунд остаётся всего 83'100. Кто сказал: «Откачать атмосферу?»

Тепловой баланс планеты Земля



Из 83'100 человеку, как части биосферы доступно всего 2'250 ТВт. Куча воды испарилась – и тут же упала обратно в океан тропическим ливнем. Бесполезно потратили энергию? Ну, не скажите. Именно улетающие в космос 80'850 ТВт обеспечивают нам относительно комфортные условия существования, с перепадом температур день-ночь на уровне 8 градусов, а не 250 с хвостиком, как на Луне.

Из 2'250 ТВт, человечество уже более или менее организованно потребляет 400 или больше. Учесть полностью, сколько мы забираем с пользой от Солнца, невозможно. Как вы посчитаете дрова, кизяк, вяленую рыбу и высушенный на солнышке рис, а также нагретую на солнце воду для летнего душа? Заметим, что из полезной солнечной энергии Человек Разумный уже овладел и попользовался примерно $\frac{1}{6}$ частью.

Далее речь пойдет только об «энергии высокой концентрации», то есть технологических ресурсов. Всё, что можно есть и пить, а также солнечное тепло для летнего душа сюда не входит. Представим данные и в табличном виде, и в виде графика.

На диаграмме показаны абсолютные теоретические максимумы. Реальные технически-достижимые значения – на порядок ниже.

На своей диаграмме напёрсточники-перцы надули публику на 50'000% Огромный жёлтый шарик «Солнечная энергия» сдулся с 23'000 ТВт до 30. Ну и остальные «возобновляемые» шарики в том же духе, кроме красненького под именем «биомасса», где посчитано-таки верно.

Зачем было нужно вешать лапшу на уши подзабывшим школьный курс термодинамики людям? Год на графике у перцев посмотрите. Две тысячи

девятый. Именно тогда Европа «осваивала» лишние деньги на строительстве убыточных ветряков и солнечных батарей, вот уважаемое агентство и подсуеутилось.

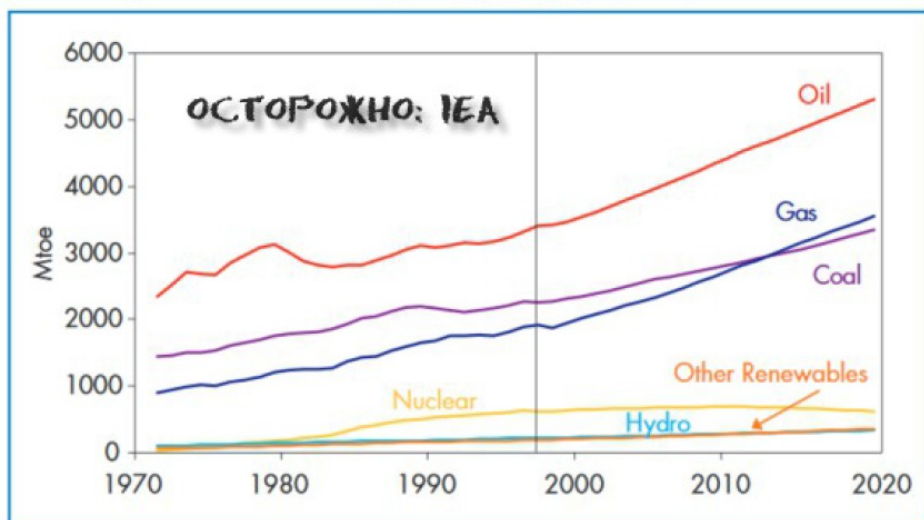


Вид энергии	В статье у Перцев	Теоретическая максимальная	Практически осуществимая	Реальная, 2016 г
Приливная	0.3 TWh	0.1 TWh	$1.25 \cdot 10^{-2}$ TWh	$1.25 \cdot 10^{-4}$ TWh
Геотермальная	0.3-2 TWh	3.6 TWh	$1.00 \cdot 10^{-1}$ TWh	$1.34 \cdot 10^{-2}$ TWh
ОТЕС	3-4 TWh	0.1 TWh	$1.00 \cdot 10^{-6}$ TWh	Нет
Гидроэнергия	3-11 TWh	4.0 TWh	1.50 TWh	$4.60 \cdot 10^{-1}$ TWh
Ветро-волновая	25.2-72 TWh	9.1 TWh	2.60 TWh	$9.60 \cdot 10^{-2}$ TWh
Солнечная (электро)	23'000 TWh	30 TWh	$3.40 \cdot 10^{-1}$ TWh	$3.80 \cdot 10^{-2}$ TWh
ИТОГО	23'090 TWh	46.9 TWh	4.6 TWh	0.61 TWh
ИТОГО, %	49230%	100%	10%	1.30%

Задачей IEA всегда было успокоить публику. Тот самый оркестр с «Титаника», помните?

До 2006 года рисовали графики бесконечного роста добычи нефти. Например, в 2000 году было сделано предсказание [12], что к 2015 году на Земле будут добывать не менее 4'900 млн тонн нефти в год, а стоить нефть будет никак не более \$18 за баррель. Чтобы не быть голословным, ниже картинка из доклада, который эти падлы продавали в 2000 году за €3000. Сейчас уже есть бесплатно.

Figure 2.1: World Primary Energy Supply by Fuel, 1971-2020



Оставим в стороне цены – про реальную инфляцию можно спорить. Но вот с добычей... По данным того же IEA, в 2014 человечество добыло 4'230 млн тонн. До предсказания не дотянули «всего» 670 млн тонн в год, или более $\frac{1}{6}$ от реальной добычи. На деле, всё больше нефти добывать никак не получалось, поэтому трудолюбивые китайские шахтёры компенсировали дефицит экологически-грязным каменным углем. Всего в 2014 году по данным «BP» добыто 3'934 млн тонн нефтяного эквивалента (или 8'165 млн тонн реальных) против прогноза IEA 3'000 млн условного топлива, то есть ошибочка вышла 25%.

Ещё заметим, что IEA предсказывала развитие возобновляемых источников энергии примерно на уровне гидро. По факту выработка гидроэнергии в 2016 году составила 4'022.9 ТВт·ч, а ветряки, солнечные батареи и прочие возобновляемые по сумме – всего 1'854.2 ТВт·ч, то есть меньше половины от выработки гидроэлектростанций.

Теперь за три тысячи евро IEA продаёт другой доклад. Там чёрным по белому сказано: Солнце! Солнце обеспечит бесконечное развитие цивилизации и неограниченные потоки энергии. А нефть не нужна совсем. Спрос уже падает.

Вообще, я взял себе за правило. Как только IEA заявляет, что чего-то на планете в достатке, надо тут же проверять. Именно этого нам скоро и не хватит.

Кричать «всё пропало, мы все умрём» ни к чему. Энергии ещё море, надо только воспользоваться с умом. Ископаемые углеводороды: нефть, уголь, газ, торф, битуминозные пески – примерно 1'120 ТВт·лет энергии²⁰. Оценки ²³⁵U разнятся от 90 до 300 ТВт·лет. Это энергия, которую мы уже знаем, как извлечь.

Кроме того, есть на Земле геологические запасы ²³⁸U и ²³²Th. Геологическая неопределённость, правда, – около $\pm 60\%$, но то, что ²³⁸U в земной коре в 138 раз больше, чем ²³⁵U, мы знаем совершенно точно. Есть ещё и дейтерий с тритием, но энергетическая эффективность недоделанного термоядерного синтеза пока непонятна.

Всё вышесказанное совершенно не значит, что следует полностью отринуть возобновляемые источники энергии. Двадцать квадратов солнечных панелей на крыше в Австралии, вращающие в дневное время компрессор кондиционера, – очень даже разумно. Но идея, будто можно плавить алюминий, развернув батареи в пустыне Сахара, – согласитесь, маразм.

Подведём предварительные итоги.

- При расчёте потребления солнечной энергии человеком следует учитывать реальные КПД. Нередко цитируемые значения полезной солнечной энергии более 20'000 ТВт можно достичь только терраформингом, за счёт полного уничтожения биосферы.
- Если не предпринимать терраформинг, реальная доступная для биосферы Земли мощность, исключая энергетические полезные ископаемые, – 2'250 ТВт. Точность оценки $\pm 20\%$. Полученное значение на порядок ниже чисел, представленных Международным Энергетическим Агентством. Куда засовывать их враньё «экспертам» IEA – решайте сами. Но для надёжности заколачивая настоятельно рекомендую использовать сапог кирзовый.
- К 2017 году человечество потребляет не менее 400 ТВт полезной мощности биосферы, или 18%. Около 90% потребляемой мощности предоставляется человеку «бесплатно» в виде пресной воды. Вмешательство человека в круговорот воды – не менее 11% от общего объёма стока континентов. Пресная вода редко учитывается в расчётах сторонников солнечной, ветряной и гидроэнергетики.
- В виде ископаемого углеродного топлива: нефти, газа и угля, человечество получает мощность 14.7 ТВт. Точных данных по энергии биосферы, получаемой от сельского хозяйства и рыболовства, в открытом доступе не обнаружено. Качественные оценки приведены в тексте. По-видимому, потребление энергии биосферы в виде продовольствия и другой биомассы – не менее 8.5 ТВт, и может быть

20 Ниже мы обсудим, сколько реально из этой энергии можно использовать.

до 35 ТВт и более.

- Замена ископаемого топлива «возобновляемыми» источниками энергии (практически: концентрация энергии Солнца) технически возможна, но вероятно приведёт к снижению уровня жизни, который у среднего землянина и так невысок. Попытки резкого увеличения производства ветряной и гидроэнергии наверняка приведут к дальнейшему ухудшению общего состояния биосферы («хаотичный терраформинг»).
- Без использования ядерной энергии урана-238 и тория, реальных путей преодоления проблемы что-то не видно. М.К.Хабберт и П.Л.Капица были таки правы, что надобно развивать бридеры и термояд, а не вертушки-хлопушки.