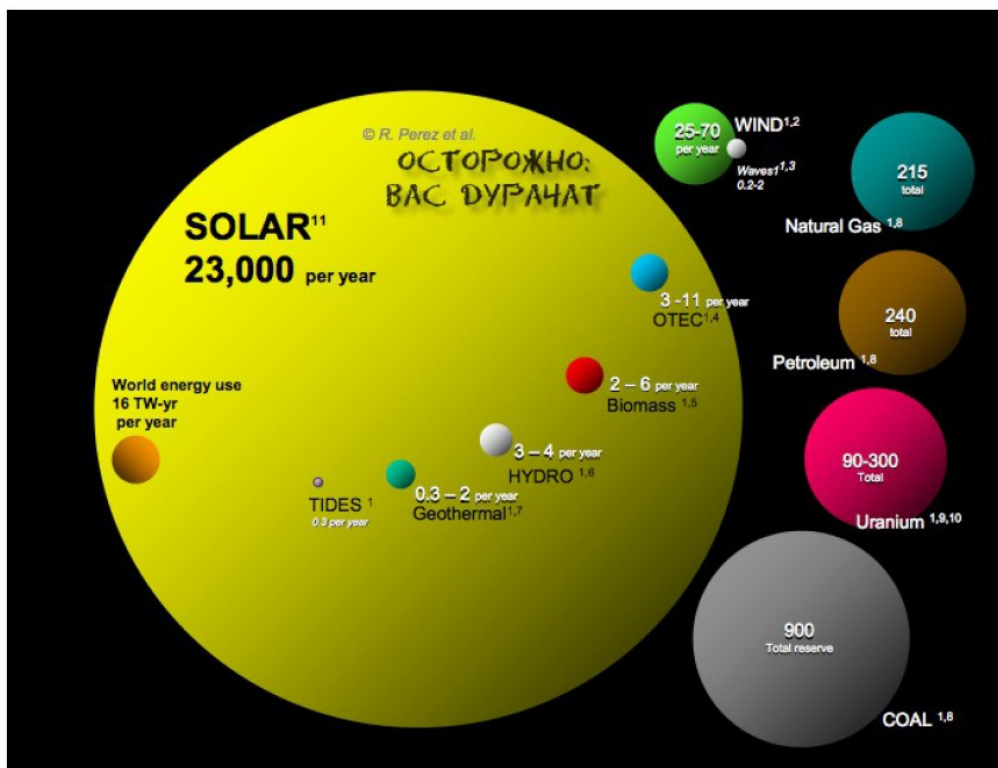


Глава 2. Земля как термодинамическая машина.

– 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.

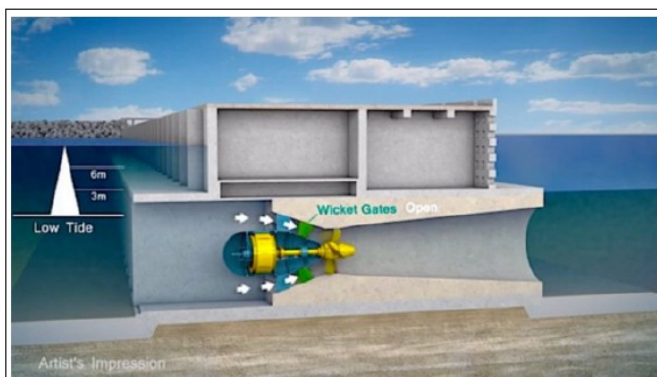
Можно ли собрать все 0.3 ТВт? Нельзя! Предположим, что вы подвесили груз массой один килограмм. Какова потенциальная энергия груза? Чтобы не решать зубодробительную задачу с тремя телами, ограничимся одной лишь Луной. Луна притягивает массу, и по формуле Ньютона легко прикинуть создаваемое ею ускорение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

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

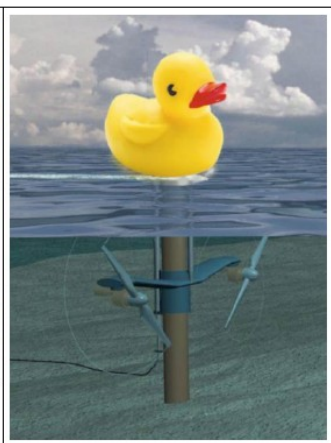
Масса Луны $7.348 \cdot 10^{22}$ кг, средний радиус орбиты $3.8 \cdot 10^8$ м. Итого, ускорение $3.4 \cdot 10^{-5}$ м/с² или $3.5 \cdot 10^{-6}$ от земного ускорения свободного падения g . Если опустить ваш килограмм на один метр, он совершит работу – выделит энергию. Если Луна у вас над головой, работы 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.



Однако, 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:

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

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: **$w_s = 1.3615$ 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}:

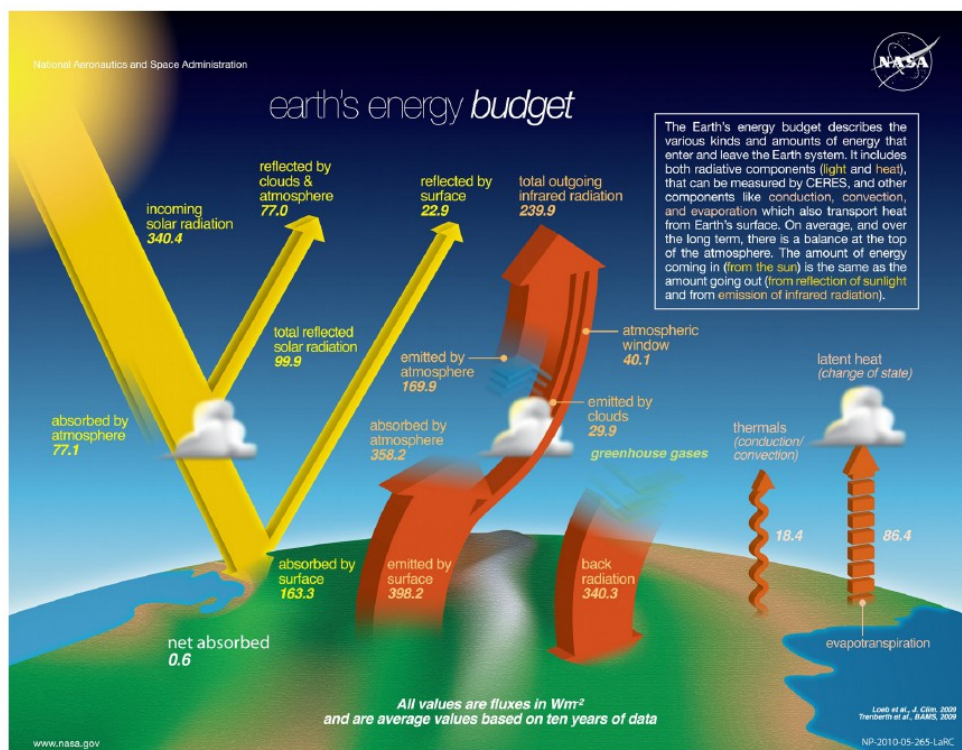
¹⁵ В комментариях встретилось, что можно якобы повысить КПД системы сверх максимального, используя фреон или подобные легкокипящие жидкости. Камарад недопонимает. Учите термодинамику!

¹⁶ Не забываем, что 1.3615 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 хрюпает 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.

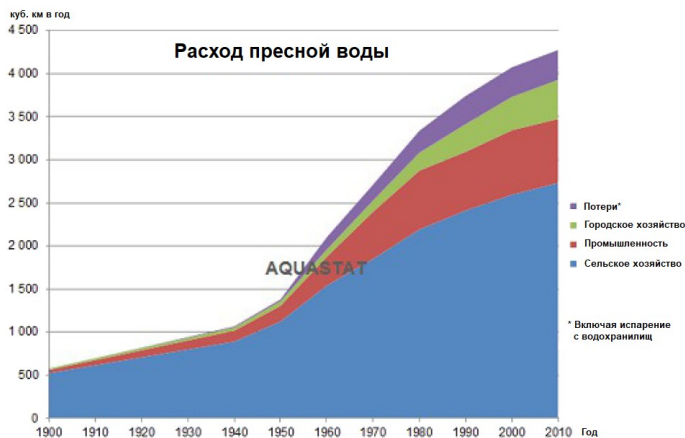
щедрыми.

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 1600 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 пахут. 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.

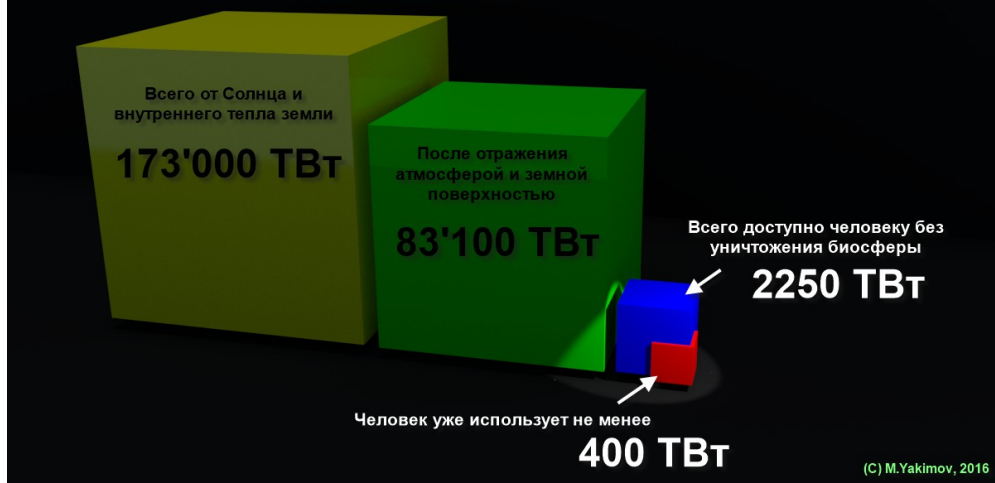
$$КПД = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}} = \frac{291^{\circ} - 283^{\circ}}{291^{\circ}} = 2.7 \%$$

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 2250 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 2250 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.

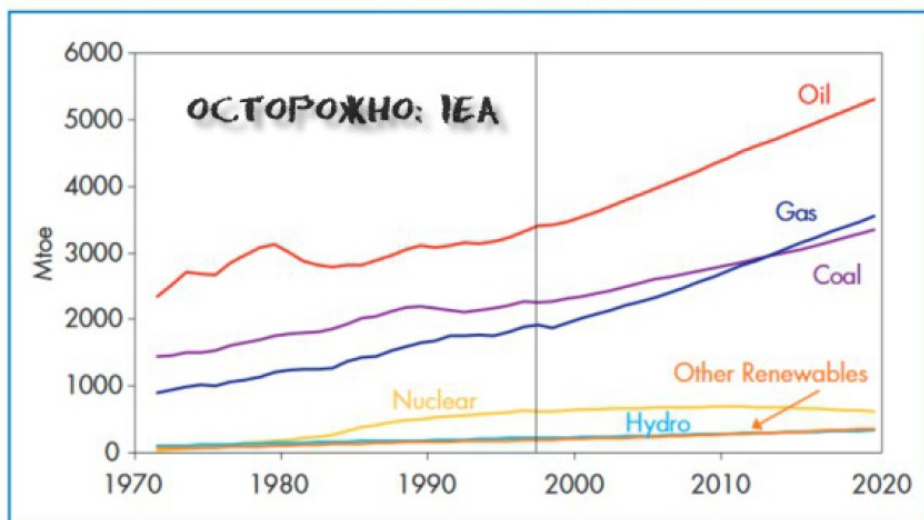


Вид энергии	В статье у Перцев	Теоретическая максимальная	Практически осуществимая	Реальная, 2016 г
Приливная	0.3 TWh	0.1 TWh	$1.25 \cdot 10^{-2}$ TWh	$1.25 \cdot 10^{-4}$ TWh
Геотермальная	0.3-2 TWh	3.6 TWh	$1.00 \cdot 10^{-1}$ TWh	$1.34 \cdot 10^{-2}$ TWh
ОТЕС	3-4 TWh	0.1 TWh	$1.00 \cdot 10^{-6}$ TWh	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 3'933.5 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.

Однако, и 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 ^{235}U разнятся от 90 до 300 ТВт·лет. Это энергия, которую мы уже знаем, как извлечь.

Кроме того, есть на Земле геологические запасы ^{238}U и ^{232}Th . Геологическая неопределённость, правда, – около $\pm 60\%$, но то, что ^{238}U в земной коре в 138 раз больше, чем ^{235}U , 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

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

быть 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.