



Глава 15. Ерой нашего времени.

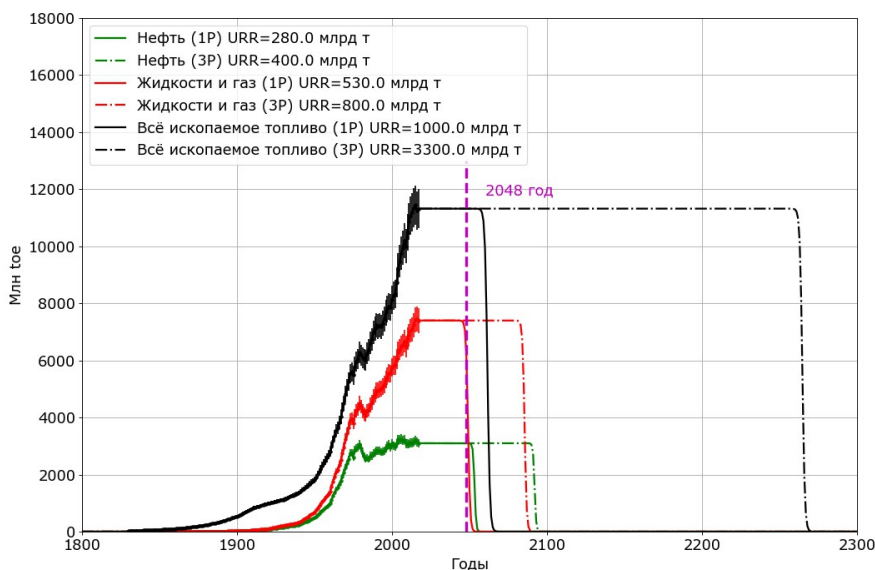
В котловане копошились сотни людей, летела земля с лопат, вспыхивало солнце на отточенном железе. Грузные грунты подводы вереницей тянулись по противоположному склону, у штабелей бетонных плит скапливалась очередная смена. Ветер крутил красноватую пыль, доносил обрывки маршей из репродукторов, установленных на цементных столбах, раскачивал огромные фанерные щиты с выцветшими лозунгами: «Гейгер сказал: надо! Город ответил: сделаем!», «Великая Стройка – удар по нелюдям!», «Эксперимент – над экспериментаторами!».

А. и Б. Стругацкие, «Град обречённый»

Простейшую математическую модель добычи мы разобрали в главе 8 – уравнение {8.4} с решением в виде хаббертианы. Там годовая добыча была пропорциональна, во-первых, уже добытому ресурсу и, во-вторых, ещё не добытому, а решением служила специальная кривая – хаббертиана {8.5} или {8.6}. Набор из трёх хаббертиан – отдельно по нефти, газу и углю – использовал Йорген Рандерс (и критиковала Гайл Тверберг) в модели *NewWorld*, которая подробно обсуждалась в главе 7. Усложним эту модель.

Сначала применим простейшую калибровку по любимому методу нефтяных компаний и энергетических агентств: «при уровне добычи X запасов хватит на Y лет». Просьба убрать детей и домашних животных, а затем закрыть листочком правую часть графика до пунктирной линии 2048 года. Отрисуем программой **Chapter 15\Model_01_Production_X_over_time_Y.py**

Модель типа "При добыче X запасов хватит на Y лет"



Сплошные линии – оценка 1P, то есть вероятность «обвала» ранее 2048 года – менее 10%. Штрих-пунктирные линии – это оценка 3P, или граница, где ресурс «кончится» с вероятностью более 90%. Теперь желающие могут быстро передвинуть листочек справа налево, закрыть графики до 2100 года и любоваться «бесконечным» количеством каменного угля. Которое произойдёт с вероятностью менее 10%.

Ясно, что в реальном мире подобных графиков добычи случиться не может. Графики подразумевают, что за год-полтора добыча с 11 миллиардов toe в год рухнет до нуля. Единственный способ добиться такого обвала – выморить популяцию, как происходило в моделях чашки Петри и острова Св.Мэтью из главы 4. Однако люди – не олени, а нефтяные скважины (включая и короткоживущие «сланцевые») и угольные разрезы – не агаровое желе. Даже в случае глобальной термоядерной войны хоть какая-то добыча должна остаться.

Здесь и далее величину спада добычи будем считать по формуле:

$$\delta = 1 - \left(\frac{Q_{2017}}{Q_{пик}} \right)^{\frac{1}{2017 - T_{пик}}}$$

{15.1}

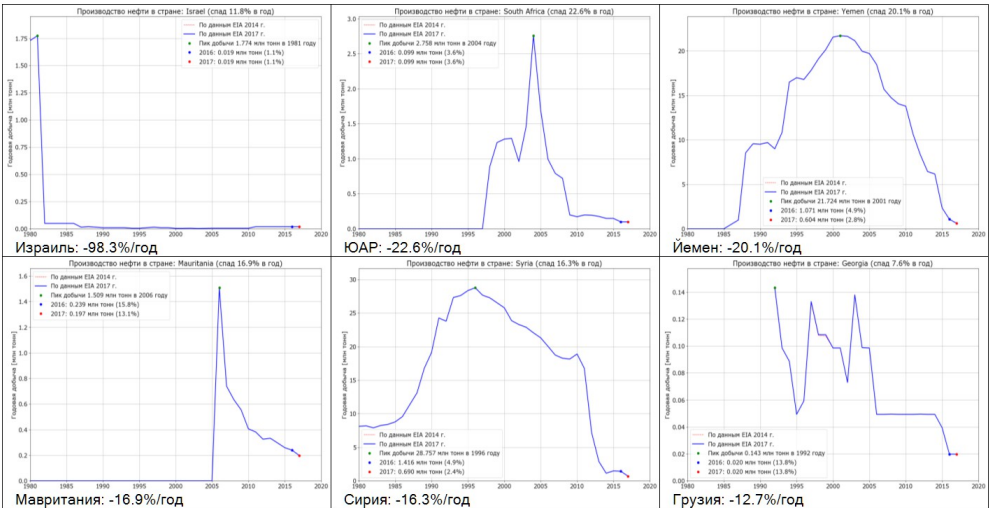
Здесь:

Q₂₀₁₇ – годовая добыча в 2017 году;

Q_{пик} – годовая добыча на пике;

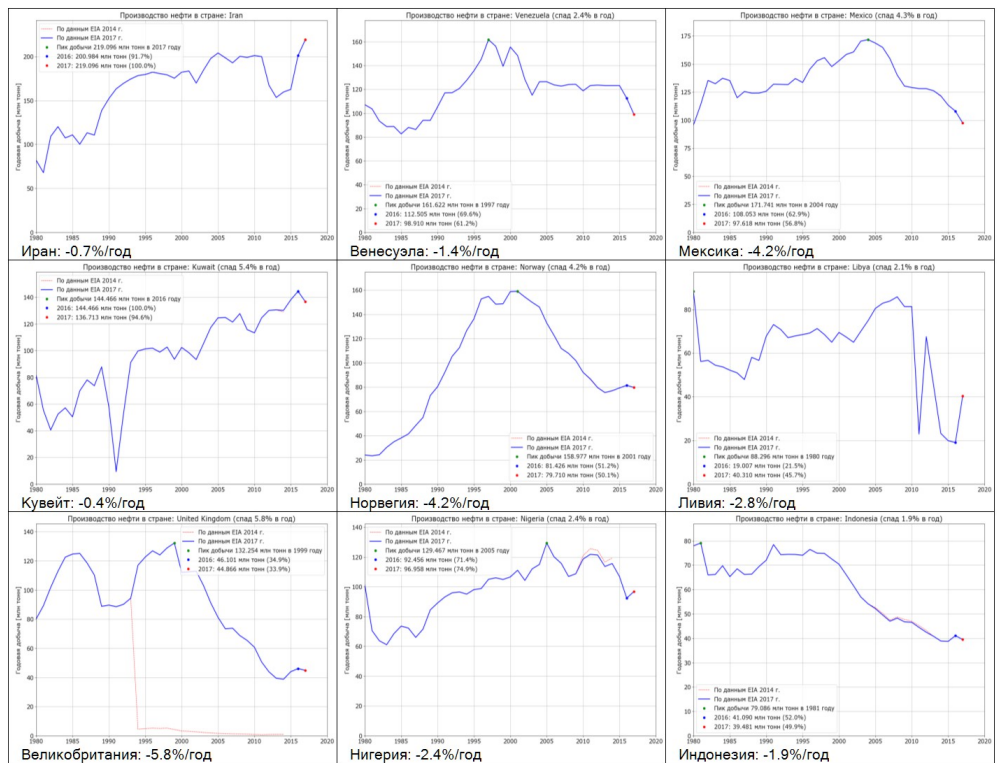
T_{пик} – год пика.

Максимальная скорость снижения добычи нефти (включая газовый конденсат) зафиксирована в Израиле, где в 1982 году в связи с закрытием единственной в стране морской нефтяной платформы годовая добыча мгновенно упала с 1.76 до 0.03 млн тонн – то есть на 98.3% за год. Израиль и ещё пять стран, где спад оказался быстрее 10% в год, представлены ниже.



Относительно крупных игроков здесь всего двое: Йемен (с добычей на пике 22.3 млн тонн в год) и Сирия (29.5 млн тонн). В обеих странах обвал добычи привёл к гражданской войне. Впрочем, понемножку воюют все шесть стран.

У игроков крупных, как Иран²¹² или Венесуэла²¹³, спад добычи происходил значительно плавнее – самая высокая скорость спада пока у Великобритании – 5.8% в год, а самая низкая – у Кувейта²¹⁴ – 0.4% в год. В среднем по группе из 66 стран, прошедших пик добычи до 2007 года (приложение VI) пик добычи нефти и конденсата прошёл в 1998 году на уровне 1.550 млрд тонн в год, а добыча 2017 года составила 74% от пика, или 1.152 млрд тонн. Среднегодовой спад добычи по формуле {15.1} – 1.5%. «Визуально» на графиках ЕИА добыча растёт в Иране и Кувейте, да и Венесуэла выглядит почти пристойно. Это оттого, что уважаемое агентство специально выбрало в качестве начала статистики 1980 год – говорят, будто добыча XX века публике неинтересна – только вот пик добычи в этих богатых нефтью странах прошёл в 1970-х.



Что модель «при уровне добычи X запасов хватит на Y лет» неприменима к реальной жизни, писали ещё авторы «Пределов роста» 1972 года[1]:

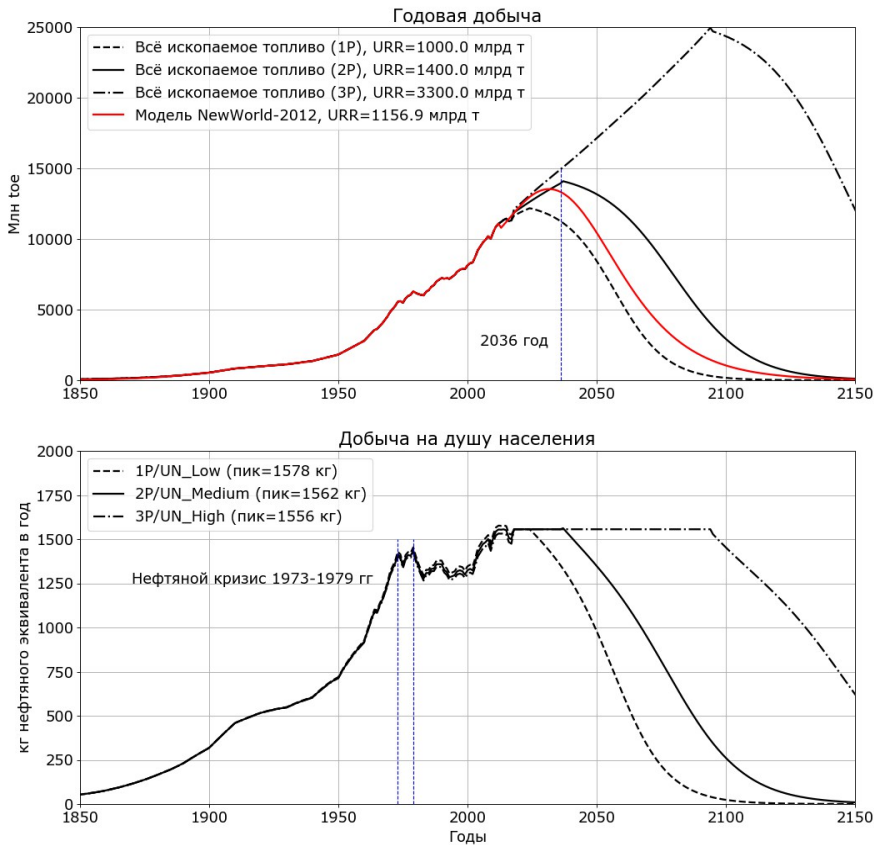
Для многих ресурсов потребление растёт даже быстрее, чем народонаселение, так как не только

212 Пик добычи в 1974 году – 303.2 млн тонн; добыча в 2017 году 225.0 млн тонн.
213 Пик добычи в 1970 году – 197.2 млн тонн; добыча в 2017 году 101.6 млн тонн.
214 Пик добычи в 1972 году – 167.3 млн тонн; добыча в 2017 году 140.8 млн тонн. Детальный график на стр. 318.

большее количество людей потребляет ресурс, но и средние запросы членов общества год от года увеличиваются. Другими словами, экспоненциальный рост потребления обусловлен двумя положительными обратными связями: ростом населения и ростом капитала (стр 55).

Если задаться целью поддерживать добычу ископаемого топлива на уровне 1.57 toe на душу в год (около 2 кВт мгновенной тепловой мощности), то с вероятностью около 10% пик добычи по тройке «уголь, нефть и газ» пройдет в 2025 году, а с вероятностью 90% – до конца XXI века. Наиболее вероятное наступление пика всех угле(водо)родных энергетических ископаемых – 2036 год. Программа **Chapter 15/Model_02_Maintaining_Per_Head_Production.py**

Модель "Поддержание добычи на душу населения"



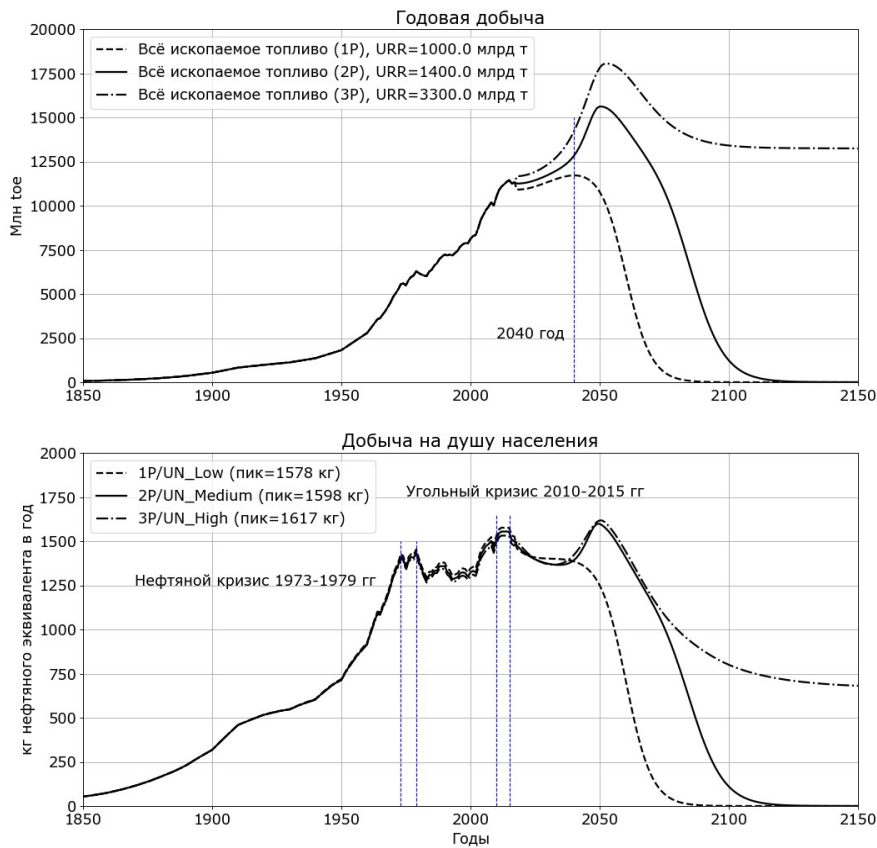
Для сравнения на графике показана красной линией оценка Рандерса из 2012 года. Напомним, что Рандерс предсказывал максимум населения планеты (8.1 миллиарда) в 2040 году, а максимум добычи ископаемого топлива – в 2031.

Здесь и далее в этой главе мы не будем делать предсказаний отдельно по нефти (точнее, «жидкостям»), природному газу и каменному углю (включая торф). Причин этому три. Во-первых, в статистику «жидкостей» непрерывно добавляют вещества не совсем жидкие (или совсем не жидкие): битум из Канады, ШФЛУ с нефтезаводов и прочее, поэтому пик нефти маскируется

этими добавками. Во-вторых, энергия из нефти – в виде моторного топлива – «спонсирует» добычу природного газа и угля, энергия газа «спонсирует» добычу нефти – например на передвижных ТЭС при гидроразрывах, а энергия угля – к примеру в виде стали для труб – «спонсирует» добычу нефти и газа. Всё накрепко взаимосвязано. В-третьих, по мере истощения нефти экономика плавно переходит на газ или уголь: автомобили и поезда могут ездить – после модификаций – и на метане, а из угля можно делать авиационный керосин; натурально, и мазут, и уголь, и газ можно использовать для выработки электроэнергии и тепла на городских ТЭЦ.

Потребление ископаемого топлива на душу населения проходило локальный пик в 1973-79 годах, и тогда этот пик был «нефтяной» – ведь добыча нефти почти вдвое превосходила добычу угля (в пересчёте на тонны эквивалента) и втрое – добычу природного газа. За пиком последовала двадцатилетняя «полочка» на уровне 1'290-1'390 кг нефтяного эквивалента на душу в год. Почти весь прирост энергии в XXI веке происходил за счёт угледобычи в КНР, и там угольный бум уже остановился. Программа **Chapter 15\Model_03_Plateau_Per_Head_Production.py**

Модель "Полочка добычи после пика"



Предположим гипотетически, что вслед за «пиком угля» в Китае случится двадцатилетняя (с 2020 по 2040 год) «полочка» потребления ископаемого топлива на уровне 1'400 кг нефтяного эквивалента на душу, аналогичная стагнации 1980-2000 годов. Далее с вероятностью около 10% произойдёт обвал добычи почти в ноль за 40-50 лет, и с вероятностью также около 10% – плавная стабилизация добычи на уровне 1950-х (700 кг/душу/год), а наиболее вероятный сценарий – абсолютный пик добычи ископаемого топлива в 2050 году с последующим обвалом в ноль за 50-60 лет. Меня согревает мысль, что гипотетический пик 2050 года будет связан с массовым строительством термоядерных реакторов. В этом случае у цивилизации-как-мы-её-знаем есть шанс.

Теперь посмотрим, какая часть добытых ресурсов будет затрачена на саму добычу. На форумах «Нефтепикников» очень любят обсуждать циферки с героическим названием «ERoEI» (Energy Returned over Energy Invested²¹⁵, «производство энергии на единицу затраченной», произносится обычно с буровицким акцентом: «е-рой»). Вот типичный график²¹⁶:



Как правило, на тех же форумах дело кончается безудержным холиваром.

Кто-то считает затраты энергии исключительно на добычу ископаемых на поверхность. Параметр называется EROEI_{st} (стандартный). Например для нефти из конкретного месторождения надо просуммировать энергетические затраты на бурение и оборудование скважины и добавить энергетическую

²¹⁵ Встречается также британская аббревиатура EROI (Energy Returned Over Invested).

²¹⁶ Адаптировано с <http://thenextturn.com/eroei-energy-cliff/>

стоимость регулярного ремонта и обслуживания и расход энергии на насос-качалку. Далее берём энергетическую ценность добытой за время полезной жизни скважины нефти и делим на полученную сумму...

$$ERoEI_{st} = \frac{k \cdot URR}{\sum E_i} \quad \{15.2\}$$

Здесь:

URR – накопленная добыча за время жизни скважины или месторождения;

k – теплотворная способность на единицу добычи;

E_i – энергозатраты на бурение, оборудование, обслуживание скважин, и т.д.

«Стоп! — говорит геолог, — Помимо добывающих скважин у нас были разведочные. Нефти мы из них получили всего по два десятка литров на анализ, но бурили-то всяко не бесплатно! Добавьте сюда энергию, потраченную на геофизические исследования и прочую ерунду. Без этой ерунды вы бы даже не знали, куда бурить».

Инженер-разработчик добавит, что кроме скважин добывающих есть и нагнетательные. Сами они нефть не производят, но без них давление в залежи упадёт, и добывающие достанут вдвое меньше. Кроме оборудования отдельных скважин есть оборудование общее – на кустах и на заводах по подготовке нефти.

Буровик стукнет по столу: «Не работает ваш хитрозадый расчёт, господин экономист! Чтобы бурить, надо проложить дороги, отсыпать площадки, поставить вагончики для людей, подтащить и смонтировать вышки (а по окончании работ – демонтировать и утащить). Ваша формула этого не учитывает, а горючее на это мы тоже тратим немерено».

Даже в пределах одного месторождения $ERoEI_{st}$ двух соседних скважин может различаться на порядок. Вот вертикальная скважина 1960 года, пробуренная в богатую основную залежь и честно дававшая нефть 36 лет. На строительство этой скважины ушло 2 км стальных труб, а бурила её простенькая установка с бригадой 30 человек, включая бульдозериста. А вот пробуренная в 2012 соседка: десятикилометровая горизонтальная, с первичными гидроразрывами. Бурили её чудом техники сто восемь специалистов, под землю совали космическую электронику, и одних инженеров по геофизической проводке скважины в реальном времени одновременно трудилось целых четверо. Потом сорок разбойников (за деньги) на тридцати насосах два дня делали гидроразрывы... Эта золотая скважина добывает нефть из крохотной второстепенной залежи (пardonьте, ТриЗ) на фланге месторождения. Точнее, добывала. На дворе 2018 год, а на куст уже поехала бригада КРС – пробку ставить и головку демонтировать. Была скважина, да вся вышла.

Экономист соглашается, что по отдельным скважинам считать $ERoEI_{st}$ – пустая трата времени, и что этот показатель имеет смысл только на уровне целого

месторождения, а то и целой страны. Вычисление по формуле {15.2} – занятие крайне трудоёмкое, потому что сумма в знаменателе для средней руки месторождения на сотню скважин состоит примерно из миллиона слагаемых. Тут вам и бурильные трубы разных типов, и долота, и обсадные колонны, и цементы (ага, они тоже разные бывают), и бентонит... Можно продолжать перечисление жизненно необходимых и недешёвых «мелочей» ещё страниц на тысячу.

Наконец подымается бухгалтер, поправляет очки и говорит: «Не смогу я вашу ерою посчитать! Вот долото буровое алмазное БКВД на 152 мм. Стоит по прейскуранту 9'000 гривен. В гривнах могу посчитать, а также в рублях и американских долларах. Если поставите пол-литра, то и в тугриках сумею. А в джоулях не могу. Нету такого параметра в прейскуранте». Тогда экономист пробует считать по другой формуле:

$$ERoEI_{st} \approx \frac{\bar{c} \cdot URR}{\sum C_i} \quad \{15.3\}$$

Здесь:

\overline{URR} – накопленная добыча из месторождения в рыночных единицах;

\bar{c} – усреднённая рыночная цена ресурса в долларах, с учётом инфляции;

C_i – затраты на бурение, оборудование, обслуживание скважин, и т. д. в долларах, с учётом инфляции.

Получается несколько проще, так как в знаменателе сумма капитальных затрат и накопленной стоимости эксплуатации месторождения, а эти показатели любой бухгалтер считает по определению. Хуже, что рыночные цены нефти, газа и угля (а также труб, долот и бентонита) скачут как попало, оттого точность вычисленного $ERoEI_{st}$ – плюс-минус один лапоть.

В энергетической отрасли подсчётами $ERoEI_{st}$ никто не занимается. Бухгалтерам, буровикам и шахтёрам этот показатель не нужен, геологам и разработчикам – тем более.

Нет сомнений, однако, что по мере добычи ископаемых показатель $ERoEI_{st}$ в среднем уменьшается. Природный битум для обработки днища своего каноэ умелый франко-канадский охотник в 1750 году добывал штыковой лопатой прямо из берега речки, выход полезного продукта «на один втык лопаты» был порядка пяти килограммов, а четырёх втыков с лихвой хватало на всё судёнышко. Полезная энергия битума раз в миллион превышала амортизацию всяко нужной в хозяйстве лопаты, $ERoEI_{st}=1'000'000$. Теперь для добычи битума требуется лопата самоходная, с черпаком сто тонн, да ещё монстрообразные карьерные самосвалы, обогатительная фабрика и крекинг-конвертеры.

В 1821 году Уильяму Харту для добычи «сланцевого газа» понадобилась пара смолёных бочек и всего 21 метр стальной трубы. В 2018 только обсадной

колонны вам надо несколько километров, да прикиньте стоимость гидроразрыва, да прибавьте трубопровод и насосно-компрессорные станции. Затраты растут куда быстрее объёма добычи.

Следующая разновидность: $ERoEI_{rou}$ (point of use – на точке применения) – включает расходы не только на добычу, но и на доставку полученных ресурсов конкретному потребителю, а также неизбежные потери при транспортировке. Одно дело везти уголь на львовскую ТЭЦ с Донбасса, а совсем другое – из Южной Африки!

$$ERoEI_{rou} = \frac{k \cdot (1 - d_{tr}) \cdot URR}{\sum E_i + \alpha \cdot URR} \quad \{15.4\}$$

Здесь:

URR – накопленная добыча за время жизни месторождения;

k – теплотворная способность нефти на единицу добычи;

d_{tr} – доля потерь при транспортировке;

E_i – энергозатраты на бурение, оборудование, обслуживание скважин, и т. д.;

α – энергозатраты на перевозку единицы ресурса до потребителя (транспортный тариф).

Для каменного угля $ERoEI_{rou}$ был на уровне 1000:1 в Англии XIV века, где босоногие дети с корзинками собирали на пляжах Уэльса «морские кочерыжки» (sea coles) – окатанные прибоем кусочки угля из прибрежных месторождений. «Доставка к потребителю» – это прошагать пару миль до ближайшей фермы или кузницы, а «потерь при транспортировке» не случилось вовсе – если корзинка по дороге порвалась, сбегашь за новой и соберёшь рассыпанное. Уже в начале XVII века уголь возили баржами по рекам и каналам, и стоимость доставки стала существенной. Существенными были и потери. На заставке этой главы – лондонские «мадларки»²¹⁷. В низкий прилив бедные оборвыши копались в жидкой грязи Темзы, вылавливая упавший с барж уголь.

Для масштаба величин прикинем $ERoEI_{rou}$ 1900 года. Электровозов пока не внедрили. Паровозик «Овечка» весело тащит из Юзовки в Киев состав из 70 двусных полувагонов – 700 тонн прекрасного донецкого антрацита. Длина состава предельная для того времени – почти 570 метров. На дистанции 675 вёрст (примерно 720 км) израсходовано около 5 тендеров того же антрацита по 7 тонн. Делим 700 тонн на 35, получается $ERoEI=20$, а мы даже не принимались ещё считать расход угля в шахтной паровой машине, подвоз дубового бруса для крепи и рацион овса для усталых подземных пони! Могут возразить, что кроме Киева есть и Запорожье, до него всего-то 160 вёрст. Но на Запорожье есть и Воронеж, и Минск, и Львов, и Москва, и всем уголь нужен, а не то начнётся разруха. В военную зиму 1916-1917 попробовали – все знают, что получилось.

²¹⁷ Mudlarks – буквально: «играющие в грязи». Хотя на пустой желудок вряд ли забавно.

Конечно, и развитие транспортной технологии может увеличивать $ERoEI_{\text{роу}}$. Например, переход к дизельной или электрической тяге на железной дороге позволил повысить показатель для транспортировки угля примерно в 6-8 раз, так как общий КПД тепловоза (нефть на нефтеперегонном заводе – дизтопливо на станции – механическая работа локомотива) или электровоза (природный газ на ТЭС – электроэнергия в контактной сети – механическая работа локомотива) – порядка 20%, а КПД паровоза – сами знаете.

Специалисты замечают, что надо, однако, включить в показатель и стоимость обогащения и переработки ископаемого топлива (как, например, превращение сырой нефти в дизтопливо и бензин или товарную подготовку газа). $ERoEI_{\text{ext}}$ (extended – в потребительском виде):

$$ERoEI_{\text{ext}} = \frac{k \cdot (1 - d_{\text{tr}}) \cdot (1 - d_{\text{proc}}) \cdot URR}{\sum E_i + \alpha \cdot URR + \beta \cdot URR} \quad \{15.5\}$$

Здесь:

URR – накопленная добыча за время жизни месторождения;

k – теплотворная способность нефти на единицу добычи;

d_{tr} – доля потерь при транспортировке;

d_{proc} – доля потерь при переработке;

E_i – энергозатраты на бурение, оборудование, обслуживание скважин, и т. д.;

α – энергозатраты на перевозку единицы ресурса до потребителя;

β – энергозатраты на переработку единицы ресурса.

Чтобы не замыкаться на нефти, газе и угле, приведём исторический пример из книги Чарльза Халла и Кента Клитгаарда «Энергия и богатство народов: основы физической экономики»[29]. Горная Швейцария примерно с 1560 по 1720 годы славилась в Европе самым крепким железом. Каждый попаданец мечтал купить доспехи швейцарской работы, ну или на худой конец научить жителей неприступных Альп делать пулемёты. Авторы так описывают среднестатистическую семью швейцарского лесоруба того времени (сокращённый русский перевод и комментарии в квадратных скобках мои):

Типичный лесоруб с семьёй вёл полу-натуральное хозяйство на площади 50 га: 2 га пашни, 8 га пастбищ и 40 га леса (50 га в год получают порядка 1500 ТДж солнечной энергии) [У меня выходит больше: $0.5 \text{ км}^2 \cdot 163.2 \text{ МВт} \cdot 32 \cdot 10^6 \text{ сек/год} = 2600 \text{ ТДж}$; спишем на облачный климат Швейцарии]. В неделю семья вывозила в город полтонны древесного угля, или 25 тонн в год. Энергия сгорания этого угля – 760 ГДж [Значит, КПД системы «лес + лесоруб = древесный уголь» по солнечной энергии – порядка 0.05%]. Работа требовала не менее 0.5 ГДж мускульной человеческой энергии и не менее 3 ГДж работы лошадей. Если считать только по затратам мускульной силы человека, то $ERoEI_{\text{ext}}$ системы около 1500:1, но с учётом затрат мускульной силы животных – порядка 220:1. [...] Однако этот расчёт не включает трату энергии на выращивание продовольствия, обогрев дома и прочие затраты на содержание самого лесоруба и членов его семьи (включая детей – замещение рабочей силы). На это уходило по расчёту не менее 105 ГДж, и видимо почти столько же энергии на содержание домашнего скота. [Авторы не приводят окончательный расчёт, но можно сделать за них: $ERoEI_{\text{soc}} = 760 / (105 + 105 + 3.5) = 3\frac{3}{4}:1$.²¹⁸]

218 Отдельно отметим, что 40 га леса захватывают в год менее $0.4 \text{ км}^2 \cdot 0.6 \text{ МВт} \cdot 1500 / 2600 \cdot 32 \cdot 10^6 \text{ сек/год} = 4300 \text{ ГДж}$ энергии Солнца; и «возобновляемым» такое лесное хозяйство может быть только если КПД перевода дров в уголь более $760 \text{ ГДж} / 4300 \text{ ГДж} = 18\%$. Естественно, подобная эффективность в Средние века только снилась, оттого леса вырубались примерно втрое быстрее, чем росли. Почти все леса в

Согласно расчёту авторов, на содержание семьи примерно из 6 человек, с четырьмя рабочими лошадьми (будем считать их «средневековым трактором») и коровой (это «средневековый холодильник»), уходило порядка 200 ГДж в год, то есть по $200 \cdot 10^9 \text{ Дж} / 6 / 31.6 \cdot 10^6 \text{ сек/год} = 1.1 \text{ кВт}$ мгновенной тепловой мощности на душу. Это уровень жизни вполне зажиточной и благополучной семьи лесоруба в 1650 году²¹⁹. «Благополучие» относительное, конечно: четыре ребёнка – вероятно выжившие из восьми или десяти родившихся.

Пример выше показывает ещё одну разновидность нашего показателя: социальный $ERoEI_{soc}$. Его обычно пробуют считать не по энергии, а по деньгам:

$$ERoEI_{soc} \approx \frac{\bar{c} \cdot (1 - d_{tr}) \cdot (1 - d_{proc}) \cdot URR}{\sum C_i + \alpha URR + \beta URR + \sum G_j} \quad \{15.6\}$$

Здесь:

URR – накопленная добыча из месторождения в рыночных единицах;

\bar{c} – усреднённая рыночная цена ресурса;

C_i – затраты на бурение, оборудование, обслуживание скважин, и т. д.;

d_{tr} – доля потерь при транспортировке;

d_{proc} – доля потерь при переработке;

G_i – заработная плата и социальное обеспечение занятых работников;

α – стоимость перевозки единицы ресурса до потребителя;

β – стоимость переработки единицы ресурса.

Стило бы сюда включить и экологический ущерб от добычи – шахтные терриконы и карьеры битуминозных песков ландшафт явно не красят. К сожалению, надёжных методов оценки необходимой для рекультивации энергии пока не существует, да если они и появятся, расчёт для аравийской пустыни, канадской тайги и техасских равнин придётся делать по совершенно разным алгоритмам, а значит в знаменателе опять добавляется множество трудно поддающихся учёту слагаемых. Вряд ли, однако, следует включать в затраты стоимость радиомаяков и предродовых УЗИ для беременных китов, как предлагают некоторые «Зелёные», которые хотят насчитать $ERoEI$ нефти и газа поменьше, чтобы потом сравнить с $ERoEI$ приливной электростанции.

Отдельный холивар – что считать в затратах G_i : только еду для ~~рабов~~ зарплату и «бесплатную» спецодежду или стоимость всей потребительской корзины занятых в энергетике работников и членов их семей (включая образование, медицину, государственные пенсии и т. п.) Нужна ли детишкам шахтёра средняя школа? Пусть после пятнадцатого дня рождения ~~на хрен~~ в шахту идут! Трудовая смена, как до сих пор практикуется в Индии и КНР.

Швейцарии были за 160 лет вырублены, и страна плавно перешла от выплавки железа к производству пистолетов, часов, сыра и шоколада. Леса восстановились. По данным управления лесов Швейцарии, в 2016 году там было 1'220'000 га лесов, но из них лишь 14'000 – реликтовые. Можно оценить, что к 1720 году трудолюбивые альпийские лесорубы вырубили леса на 95-98%.

219 В главе 12 приводились данные по среднему потреблению в Англии и Уэльсе в 1650 году: менее 850 Вт на душу.

Впрочем, даже с едой и спецодеждой не так всё однозначно. Энергетическая ценность миски тюремной баланды из брюквы вероятно даже превышает калорийность порции филе-миньон в пятизвёздочном ресторане – ведь пятизвёздочные клиенты фигуру-то берегут, – однако для приготовления звёздного ужина уходит куда больше энергии (музыка Моцарта и ежедневный массаж для коров чего-то стоят). Можно включить в спецодежду шахтёра респиратор, а можно и не включать. Последнее явно повышает эффективность угледобычи – товарищ помрёт в сорок пять, и пенсию не платить. Лично я подобный чёрный юмор не одобряю, но из песни слова не выкинешь – это типичный уровень цинизма у желающих насчитать ERoEI каменного угля побольше, чтобы доказать, что АЭС (на которых труд пятнадцатилетних-с-неполным-восемилетним отчего-то не востребован) ~~не крутят~~ не катят.

Ясно, конечно, что для любого энергетического ресурса:

$$1 < ERoEI_{soc} < ERoEI_{ext} \leq ERoEI_{pou} \leq ERoEI_{st}$$

С точностью «плюс-минус лапоть» ERoEI считают энтузиасты – экономисты в академической и полуакадемической среде, как, к примеру, в вышедшем в 2013 году исследовании группы учёных из британского центра экологических исследований SUNY[30]. Приведём выдержку (перевод мой, в скобках ссылки авторов работы). Речь ниже идёт о ERoEI_{st}:

- В Соединённых Штатах показатель ERoEI новых открытых нефтегазовых месторождений снизился с 1000:1 в 1919 году до 5:1 в 2010, для добычи с уже освоенных месторождений – с 30:1 в 1970-х до менее чем 10:1 сегодня (Gilford et al, 2011). Тот же показатель в целом по планете (включая США) снизился с 30:1 в середине 1990-х годов до примерно 18:1 в 2006 (Gagnon et al, 2009). ERoEI отдельно для нефти и для природного газа установить затруднительно, поскольку мировая статистика добычи не показывает отдельно «жидкости» из газовых скважин и попутный газ из нефтяных (Murphy and Hall, 2010, Gupta and Hall, 2011).
- В угольной промышленности ERoEI к 1980-м годам снизился с 80:1 до 30:1, но затем, в связи с ускоренной разработкой месторождений открытым способом [М.Я.: и наплевательского отношения к рекультивации], вернулся к 80:1 примерно в начале 1990-х. Качество добываемого угля продолжает снижаться, в то время как добыча в тоннах до последнего времени росла (Hall and Klitgaard, 2012) [М.Я.: это писали в 2013 году, тогда ещё росла]. В добыче США²²⁰ начали преобладать низкие ранги угля, и несмотря на увеличение добычи в тоннах пик добычи угля по энергии прошёл в 1998 году (Hall et al, 2009, Murphy and Hall 2010).
- Подсчёт ERoEI по ядерной энергии оживлённо дискутируется. Сложность расчётов вызвана необходимостью оценки технологических затрат и экологических последствий извлечения урановой руды разнородного качества, а также ликвидации возможных аварий (таких как Чернобыль и Фукусима). Большинство исследователей (например, Hall and Klitgaard, 2012) полагают значение ERoEI в пределах от 5:1 до 15:1, есть неопубликованные исследования, показывающие существенно больше.
- Почти все возобновляемые источники энергии имеют низкие значения ERoEI по сравнению с традиционным ископаемым топливом. Этанол на основе кукурузы имеет ERoEI меньше чем 2:1 (например, Patzek, 2004, Pimentel and Patzek, 2005, Farrell et al. 2006, Hammerschlag, 2006). Ветровая энергия имеет относительно высокое значение ERoEI, возможно до 18:1 (Kubiszewski, 2010), но для солнечных электрических батарей [М.Я.: сюда не включают солнечные нагреватели воды, где значения существенно выше] показатель продолжает оставаться низким, как абсолютный максимум, не выше 7:1 (Prieto and Hall, 2012). Если учитывать необходимость затрат на решение проблемы прерывистости солнечной и ветровой энергетики [М.Я.: например, гидроаккумулирующих станций, как разбирали в главе 12], то их

220 Пик добычи угля в США подробно обсуждался в главе 13.

ERoEI уменьшается ещё сильнее [М.Я.: вероятно до 3:1 у ветровых и 1:1 у солнечных], но с другой стороны, электрическая энергия [по сравнению с химической энергией ископаемого топлива] может быть преобразована в механическую работу с гораздо большей эффективностью.

В 2014 году Джессика Ламберт со товарищи²²¹ предложила считать $ERoEI_{soc}$ по упрощённой схеме:

$$ERoEI_{soc} \approx \frac{GDP}{\sum q_i \cdot \bar{c}_i} \quad \{15.7\}$$

Где:

GDP – внутренний валовый продукт (ВВП) страны или региона в текущих долларах (либо в долларах за какой-то конкретный год, например 2010);

\bar{c}_i – усреднённая рыночная цена ресурса (угля, нефти, газа, гидро и т. д.) в текущих долларах (либо в долларах за какой-то конкретный год, например 2010);

q_i – потребление ресурса (угля, нефти, газа, гидро и т. д.) экономикой страны либо региона.

Красота подхода, безусловно, в том, что значения потребления угля, нефти, и так далее для стран и регионов, благодаря «BP» и EIA мы знаем довольно-таки неплохо, а цены на ресурсы даёт биржа. Коэффициент нечувствителен к инфляции, так как доллары в числителе сокращаются с долларами в знаменателе. С методикой подсчёта ВВП (мы используем числа МБ²²²) дело обстоит значительно хуже, но об этом чуть позже.

Для примера приведём прикидку показателя $ERoEI_{soc}$ для США, КНР, Индии, России, Кувейта и Украины в 2017 году.

Потребление ископаемого топлива в единицах и условных затратах (2017 г):

Страна	Нефть, млн барр.	Газ, трлн фут ³	Уголь, млн ст. тонн ²²³	Затраты, млрд \$	% в мире	Энергия, 10 ¹⁸ Дж	% в мире
США	7'256	26.1	688	601	17.7	77	16.3
КНР	4'672	8.5	3'919	681	20.0	111	23.5
Индия	1'712	1.9	878	188	5.5	28	6.0
Россия	1'177	15.0	191	167	4.9	25	5.3
Кувейт	164	0.8	0	13	0.4	2	0.3
Украина	75	1.1	51	15	0.4	2	0.5
В мире	35'838	129.6	7'727	3'399	100.0	472	100.0

²²¹ Jessica G. Lambert, Charles A.S. Hall, Stephen Balogh, Ajay Gupta, Michelle Arnold, Energy, **EROI and quality of life**, Energy Policy, 64(2014)153–167

²²² Данные тут: <https://data.worldbank.org/indicator/ny.gdp.mktp.cd>

²²³ Пересчитано из toe как 2.07 стандартные тонны на toe.

В качестве условных цен (для прикидки точные региональные значения нас не интересуют) используем средние по данным «BP» за 2017 год[10]: \$53.1 за баррель нефти, \$5.7 за тысячу кубических футов газа, \$98 за метрическую тонну угля и \$0.1 за киловатт-час поставленной в общую сеть электрической энергии (сюда включается ядерная и гидро плюс все прочие возобновляемые).

Китай потребляет каменного угля больше, чем все остальные страны мира, вместе взятые. Лидером по потреблению сырой нефти (в баррелях) и природного газа являются США (20.2 и 20.1% от мировой добычи соответственно). КНР по этим позициям отстаёт (13.0 и 6.6 %). На втором месте по потреблению газа – Россия (11.6%). Если пересчитать в условные доллары по нефтяным ценам, то весь мир тратит на ископаемое топливо 3.4 триллиона долларов в год, из них КНР – ровно пятую часть: \$680 млрд. Если считать по чистой энергии, то весь мир потребляет $472 \cdot 10^{18}$ Дж в год²²⁴, из которых Китай – 23.5%. Энергия обходится Китаю несколько дешевле в связи с преобладанием в структуре потребления каменного угля.

Потребление ядерной, гидро и прочей возобновляемой энергии в единицах и условной стоимости (2017 г):

Страна	Ядерная, ТВт·ч	Гидро, ТВт·ч	ВИЭ без гидро, ТВт·ч	Затраты, млрд \$	% в мире	Энергия, 10^{15} Дж
США	847	297	419	156	17.7	5'626
КНР	248	1'156	472	188	21.2	6'753
Индия	37	136	96	27	3.0	970
Россия	203	183	1	39	4.4	1'395
Кувейт	0	0	0	0	0.0	0
Украина	1	9	2	2	0.2	69
В мире	3'636	4'060	2'152	885	100.0	31'849

Если считать по цене \$0.1 за киловатт-час, человечество затратило 0.9 триллиона долларов на производство $31.8 \cdot 10^{18}$ Дж электроэнергии, то есть на один триллион можно было бы купить $35.3 \cdot 10^{18}$ Дж. Из ископаемого топлива на \$1 трлн капусты покупалось $138.8 \cdot 10^{18}$ Дж, то есть в 3.9 раза больше.

Сторонники «экологически чистой» энергии указывают, что каждый джоуль электроэнергии гораздо полезнее, чем джоуль тепловой энергии из нефти и угля, потому что его можно превратить в механическую работу с КПД порядка 90%.

Сторонники ископаемой энергии возражают, что электроэнергию трудно запасть впрок и передавать на большие расстояния: всяческие глобальные

224 Для пересчёта в мгновенную мощность надо поделить это значение на $31.6 \cdot 10^6$ (количество секунд в году). Получится 14.9 ТВт. В 2016 году было 14.7 ТВт.

ЛЭП, литиевые батарейки Илона нашего Маска (на целый город) и гидроаккумулирующие станции – и стоят немало, и имеют КПД в районе 75-90%, притом что на нормальных ТЭЦ из 3.9 Дж ископаемого топлива гарантировано получается 1.5 Дж местной (а не за тысячу километров) и в данный момент необходимой (а не произведённой прошлым летом) электроэнергии, да дармовое тепло. Бывают и ситуации, когда технологический процесс требует не электричества, а просто высокой температуры – к примеру, производство цемента. Из 4.9 Дж природного газа грамотный теплотехник выжмет никак не менее 4.8 Дж теплоты, а из 1 Дж электроэнергии даже с подподвывертами типа тепловых насосов²²⁵ удастся выжать реально 2-2.5 Дж полезного тепла (да и то не для обжига цемента, а для разве что для обогрева помещений). Наконец, из электроэнергии очень сложно делать пластик, удобрения и прочие полезные материалы, а из газа, нефти и угля – довольно-таки легко. Расчёты можно продолжать до бесконечности – ещё один повод затеять холивар, но мы не будем.

Теперь просуммируем всё вместе и добавим ВВП (в долларах 2017 года):

Страна	Ископаемая энергия, млрд \$	Ядерная и ВИЭ, млрд \$	Всего, млрд \$	ВВП, млрд \$	Оценка ERoEI _{soc} по формуле 15.7
США	601	156	757	19'391	25.6
КНР	681	188	869	12'238	14.1
Индия	188	27	215	2'598	12.1
Россия	167	39	206	1'578	7.7
Кувейт	13	0	13	120	9.2
Украина	15	2	17	112	6.6
В мире	3'399	885	2'152	80'684	18.8

Внезапно оказывается, что самый высокий показатель ERoEI_{soc} – у Соединённых Штатов! Импортирующие энергоресурсы Китай и Индия имеют вдвое меньше, а экспортёры энергоресурсов – примерно втрое меньше, чем США. Ну и сразу понятно, отчего это. В ВВП США велика доля услуг, которые стоят относительно дорого, но требуют малых затрат энергии: университетское образование и услуги корпоративного тренинга, страшно дорогая медицина, а также всякая лабуда: платные парковки, кутюрье и модные парикмахерские (а вот кому стрижку за \$960?), психотерапевты для нервных кошечек и собачек, юристы, чтобы судиться с «Макдональдсом» за разлитый кофе, поездки на «Uber», и тому подобное. В странах, где ВВП в основном строится из произведённых на экспорт предметов потребления, энергоёмкость выше, соответственно ниже и показатель. Ну и экспортёры

²²⁵ Тепловые насосы для обогрева помещений обсуждались в главе 12. При желании можно насчитать КПД куда больше 100%, но это при температуре окружающей среды близкой к комнатной. Если в комнатах хочется 25°, а на улице 22°, хороший тепловой насос может выдать «условный КПД обогрева» до 800%; а если в на улице – те же 25°, то «условный КПД обогрева» бесконечен – просто откройте окна.

сельхозпродукции и/или энергетического сырья (как Кувейт, Россия и Украина) автоматически попадают вниз, вне зависимости от $ERoEI_{st}$ и $ERoEI_{rou}$.

Уважаемые авторы не вполне понимают значение слова «энергия». Достаточно сказать, что в таблице 2 на стр. 157 мегаджоули магическим способом переводятся в киловатты (должно быть, конечно, «киловатт-часы» – kWh, но букву h Ламберт «позабыла»). Последователи цитируют с той же ошибкой:

Table 2
Energy (MJ) per unit of fuel (E_f).

Fuel	Energy per unit of fuel	Source
Coal	4,882 to 29,107 MJ/t	EIA (2012a)
Oil	5,455 to 6,521 MJ/bbl	EIA (2012a)
Natural gas	945 to 1372 MJ/cf	EIA (2012a)
Combustable renewables	5,702 MJ/t (Green wood)	USDA (2012)
Primary energy	3.6 MJ/kW	BP (2012)

Далее Ламберт и К^о начинают коррелировать свой кривоватый $ERoEI_{soc}$ с другим довольно кривым коэффициентом – HDI, индексом человеческого/гуманитарного развития, который с 2010 года подсчитывается ООН по формуле:

$$HDI = 0.0729 \sqrt[3]{(LEB - 20) \cdot \left(\frac{MYS}{5} + \frac{EYS}{6}\right) \cdot \ln\left(\frac{GNI_{ppc}}{100}\right)} \quad \{15.8\}^{226}$$

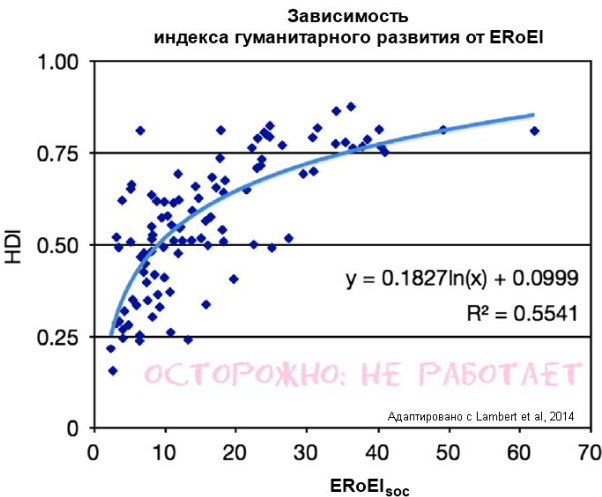
Здесь:

LEB – ожидаемая продолжительность жизни;

MYS, EYS – среднее число лет в школе/университете для населения в целом и для учащихся;

GNI_{ppc} – валовый национальный доход на душу населения (по покупательной способности).

Ламберт получила корреляцию, как показано ниже:



226 До 2010 года формула чуть отличалась и давала чуть меньшие значения.

Волшебная ~~скандинавская~~ страна, где люди (а) в среднем живут до 85; (б) семья в среднем из 4 человек; папа с мамой, (в) отучившись в колледже, MYS=15, (г) приносят домой с работы по \$150'000 в год до налогов, GNI=\$75'000; и (д) все детки в среднем поступают в университеты и доучиваются до бакалавров EYS=18, будет иметь HDI ровно 1.0. С другой стороны, ещё более волшебная страна нефтяных магнатов с LEB=85, где дети ходят только в начальную школу MYS=EYS=5, но годовой доход по \$257 миллиардов на каждого мажора, будет тоже развита на 1.0. Миллиардерам образование ни к чему, у них секретарши есть.

В реальности волшебных стран не бывает, а для 2017 года воспользуемся оценкой ООН²²⁷

Страна	Оценка EROEI _{сoс} по формуле 15.7	HDI по данным ООН за 2017 год	HDI по корреляции Дж.Ламберт	\$ВВП на кДж затраченной энергии	Мгнов. Мощность Вт/душу
США	25.6	0.924	0.692	234	7'860
КНР	14.1	0.752	0.583	104	2'590
Индия	12.1	0.640	0.555	88	670
Россия	7.7	0.816	0.472	60	5'740
Кувейт	9.2	0.803	0.505	75	11'960
Украина	6.6	0.751	0.446	44	1'810
В мире	18.8	0.720	0.636	160	2'040

Как видим, «корреляция Ламберт» в 2017 году не работала от слова «совсем». Как бы ни критиковали HDI, но США не может иметь такой же показатель, как Вьетнам (0.694), а Украина пока не скатилась ниже уровня Йемена (0.452).

У Ламберт статья закончилась пирамидкой Маслоу²²⁸:



J.G. Lambert et al. / Energy Policy 64 (2014) 153–167

227 <http://hdr.undp.org/en/countries>
228 Адаптировано с <http://thenextturn.com/eroei-energy-cliff/>

По показателям выходит, что Украина стоит на грани голода, Россия совсем не может позволить себе образование, в Кувейте образование ещё как-то держится, а вот с медициной швах, в Индии есть медицина, но нет искусства и науки, и лишь Китай и США могут позволить себе развитую цивилизацию.

Рассуждения Джессики Ламберт ломаются теоретическим контр-примером. Пусть есть три островных государства: А, В и С. В нашем гипотетическом мире – паропанк: нефти и газа пока не нашли, ядерной энергии так и не открыли, единственным ископаемым источником энергии является уголь (зато его много). Все три страны добывают по 50 млн тонн в год, но А использует на собственные нужды 1 млн тонн, В – 3.5 млн тонн, С – 10 млн тонн. Остальной уголь направляют на экспорт на материк D, откуда на острова импортируют продовольствие и предметы потребления (а также роскоши). По формуле {15.7}, $ERoEI_{soc}$ получается 50, 14.3 и 5 соответственно. Следует ожидать в стране А рассвета высоких искусств, образования, медицины и науки, в стране В – приемлемый уровень жизни, а в стране С – ад крошечный, на уровне регулярных голодоморов населения.

Табличка ниже показывает, что всё совсем наоборот:

Показатель	Страна А	Страна В	Страна С
Добыча угля, млн т в год	50.0	50.0	50.0
Потребление угля, млн т в год	1.0	3.5	10.0
В том числе на собственные нужды угледобычи, млн т в год	0.5	2.0	7.0
$ERoEI_{soc}$ по формуле {15.7}	50.0	14.3	5.0
$ERoEI_{st}$ по формуле {15.2}	100.0	25.0	7.1
Потребление угля в домашнем хозяйстве, млн т в год	0.5	1.5	3.0
Население, млн	10.0	1.0	0.1
Эквивалентная мощность по добыче на душу населения, Вт	3'165	31'650	316'460
Эквивалентная мощность по расходу на душу населения, Вт	63	2'215	63'291
Эквивалентная мощность по расходу в домашнем хозяйстве, Вт	32	949.0	18'987
Эквивалентная мощность за вычетом затрат на добычу, Вт	3'133	30'380	272'152
Доходы от экспорта угля, млн \$	4'900	4'650	4'000
Доход на душу населения, \$ в год	490	4'650	40'000
Ожидаемая продолжительность жизни, лет	30	60	80
Среднее число лет образования	3	10	12
HDI по формуле {15.8}	0.189	0.602	0.849

В стране А проживает 10 миллионов народа, из них около 50 тыс «элиты»: от многочисленной семейки короля до охраны и шестёрок – со среднегодовыми доходами по \$25'000 на душу. Остальные 9'950'000 имеют по доллару в день и работают «за миску похлёбки», выкапывая уголёк кайлом и перемещая на тачке к пристани²²⁹. Детишки полноправно участвуют в трудовом процессе лет примерно с десяти, детская (да и взрослая) смертность – сами понимаете. На хозяйственные нужды средний гражданин имеет 32 ватта – ни о каком электричестве не идёт и речи; общая печка в бараке на пятьсот рыл – вершина технологии. Показатель гуманитарного развития – 0.189 (такого в списке ООН нет; на 188 месте – Центрально-Африканская Республика с индексом 0.367).

В стране В проживает 1 миллион человек, среднегодовой доход по \$4'650. Типичная семья: родители и двое детей, папаша – натурально, шахтёр (отбойным молотком уголёк рубит), мама – учительница, повариха, продавщица или фельдшерича. Электричество в доме имеется почти у всех (ну кроме самых нищebroдов): лампочка Ильича «Osram», да ещё приёмник или телевизор. У соседей вот даже холодильник есть – комфорт! Уровень жизни соответствует Бангладеш (там 0.608).

Население страны С – всего лишь 100'000, а живут они примерно как в Португалии (0.847). Средний взрослый мужчина – государственный служащий или уже пенсионер. Среднегодовой доход на душу населения – \$40'000. На местном угольном разрезе трудится всего 400 мужиков – десять сменных операторов трёх самоходных лопат (это там, где один ковшик – 100 тонн угля), полста водителей карьерных самосвалов, да всякие там геологи, механики и менеджеры. Естественно, и медицина, и образование – на высоте. Футболистов выписываем из Испании, хоккеистов – из России. И наука академическая есть – Цэшенский институт угольной геологии – слышали? Имея почти по 19 киловатт тепловой мощности на душу, среднему жителю страны гарантируется порядка 5 кВт домашнего электричества. Сейчас залезу в домашнюю электрическую сауну, ага!

		
ERoEI _{soc} = 50 ERoEI _{st} = 100	ERoEI _{soc} = 14.3 ERoEI _{st} = 25	ERoEI _{soc} = 5 ERoEI _{st} = 7

229 При мелком залегании угля и месторождении вблизи побережья это вполне технически возможно: 5 миллионов работников добывают в год по 10 тонн угля каждый, то есть по 30 килограммов в сутки в среднем. Рабочая норма каторжника на Сахалине в 1900 году была почти в 12 раз больше.

Приведённое выше рассуждение не для того, чтобы убедить читателя, будто со снижением $ERoEI_{soc}$ повышается благосостояние страны, а для демонстрации, что уровень жизни конкретного региона зависит от массы факторов: популяции, климата, наличия или отсутствия средств производства, точек сбыта, ну и от геологии месторождений, конечно. Пытаться коррелировать уровень жизни *исключительно* с $ERoEI$, то есть с только с местной геологией, игнорируя всё остальное, – бесполезно.

В пределах *конкретной* страны или провинции снижение $ERoEI$, естественно, приводит к ухудшению качества жизни. Допустим, что таблица выше относится к условному 2000 году (напоминая, что у нас гипотетическая Земля, на которой паропанк). Исключительно в связи с истощением месторождений²³⁰ ожидается снижение $ERoEI_{soc}$ в два раза за 25 лет, то есть снижение по 2.7% в год.

В **стране С** к условному 2025 году расходы на добычу остаются прежними – в новые экскаваторы никто, натурально, инвестировать не собирался; добыча опускается до 20.0 млн тонн в год (остальное – пустая порода). На материк теперь вывозят не 40 млн тонн, а всего 12. Сократилось и потребление электроэнергии населением: вместо 3 млн тонн угля в год местные ТЭЦ тратят 1 млн тонн, а электричества вырабатывают по 1.7 кВт на душу. Домашние сауны в наличии, но их включают крайне редко – средний доход на душу населения рухнул с \$40'000 до \$12'000, не до излишеств! Вместо университетов у детишек обязательная десятилетка. Из-за нехватки денег на продвинутую медицину ожидаемая продолжительность жизни – 75 лет. HDI = 0.721, как сейчас в реальном Узбекистане или на Ямайке.

В **стране В** добыча выросла с 50 млн т до 57, но теперь на нужды добычи уходит куда больше энергии: 8 млн тонн. Шахты стали глубже, рабочий день шахтёра – полных 13 часов, из которых 10 в забое. На шахты идут в 15 лет, а в стране всеобщее семилетнее образование. Ожидаемая продолжительность жизни мужчин – 39 лет, женщин – 61, а в среднем – 50. Но есть и положительные стороны! Вместо телевизоров теперь – китайские подделки под iPhone, а средние доходы повысились с \$4'650 до \$4'900, потому что хозяин шахты щедро платит пособия по инвалидности и потере кормильца. Жить стало легче, жить стало веселее™, а когда веселее, и HDI = 0.488, как на неунывающем острове ~~Чунга-Чанга~~ Гаити (0.498).

Страна А в 2025 году... Простите, такой страны нет! К 2009 году добыча сократилась до 39 млн тонн ($ERoEI=39$), на душу населения стало приходиться менее \$1 в сутки, возник голод. Местная «элита», собрав золотишко, рванула когти. Я слышал, наследный принц стал владельцем сети супермаркетов и кормит престарелых родителей. Вся семейка живёт в столице D, уже без

²³⁰ В блоге возразили, что политические проблемы могут возникать в странах и по другим причинам, кроме истощения месторождений. Возражение молчаливо принимается! Не будем спорить, что было раньше – курица или яйцо. Иногда спусковой собачкой кризиса являются политические проблемы, например, война; иногда это может быть неурожай или стихийное бедствие. В гипотетическом примере исследуется исключительно влияние параметра $ERoEI$ на благосостояние народа.

особых почестей. В 2011 разразилась «народная революция», в которой кирками забили и на тачках вывезли полмиллиона народу. Пара удачливых миллионов кое-как добралась до побережья D... где их встретили ~~цветами~~ бронепоездами. Что конкретно сейчас происходит на острове A – неизвестно. Возможно, каннибализм. Проверять опасаемся, а $HDI = XZ$.

Из примеров следует, что $ERoEI=2.5$ совсем не обязательно означает уничтожение народного образования и медицины, а $ERoEI=40$ – вовсе не гарантия, что добыча в этой стране будет продолжаться. Опять-таки всё зависит *от массы факторов* за пределами геологии.

Короче, показанную выше пирамидку Абрама Маслоу следует засунуть туда же, куда и «биорезонансные» пирамидки Александра Голода, и сразу следом – формулу {15.7}. Сомневаюсь, что можно что-то полезное подсчитать по формуле {15.6} – слишком много допущений. С другой стороны, и $ERoEI_{st}$ по формулам {15.2} и {15.3} не даёт полной картины. Действительно, нефть в цистерне посреди аравийской пустыни сама по себе обществу бесполезна. Чтобы принести конкретную пользу, нефть должна доехать на танкере до конкретного нефтезавода в Амстердаме, пламенно соединиться там с природным газом хиреющего Северного моря, а потом в виде бензина и дизтоплива попасть на конкретные автозаправки *хереющей* Европы. Значит, имеет смысл рассматривать в дальнейшем только $ERoEI_{rou}$ и/или $ERoEI_{ext}$ по формулам {15.4} и {15.5}.

В качестве рабочей гипотезы выскажем предположение, что уровень жизни зависит от нетто (полезной) энергии на душу населения:

$$q_{pc}(t) = \frac{q(t)}{P(t)} \left(1 - \frac{1}{ERoEI_{ext}(t)} \right) \quad \{15.9\}$$

Где:

q_{pc} – нетто энергии на душу населения в год как функция от времени;

q – годовая добыча;

P – население.

Член $(1-1/ERoEI_{ext})$ имеет тот же физический смысл, что и термодинамический КПД по формуле {2.1}. Выразим $ERoEI_{ext}$ как функцию от накопленной добычи ископаемого топлива $Q(t)$:

$$ERoEI_{ext}(t) = 10^{Sig(Q(t), Q_0, \sigma, 2, 0)} \quad \{15.10\}$$

Здесь:

$0 \leq Q(t) \leq 3'300$ – накопленная добыча в млрд toe как функция от времени;

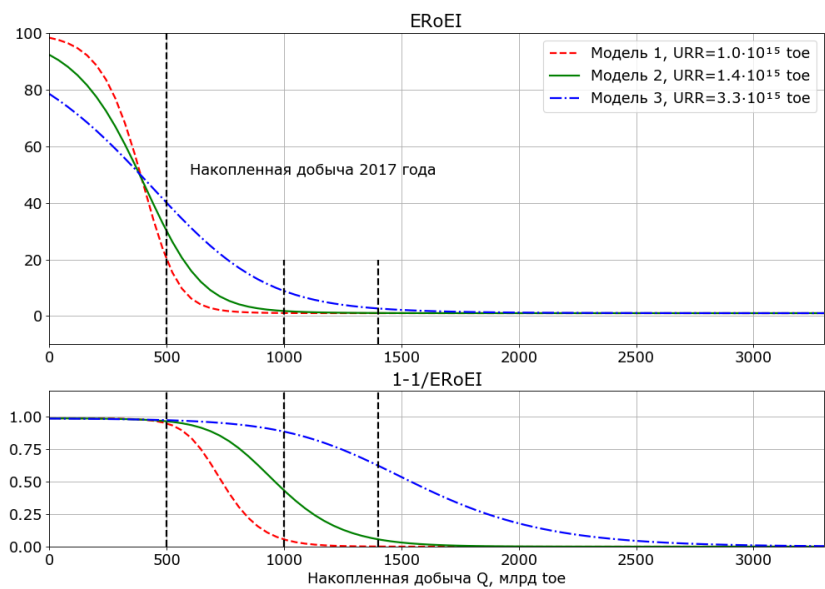
$0 < Q_0$ – накопленная добыча (501 млрд toe) в 2017 году;

σ – подгоночный коэффициент.

Три модели показаны программой **Chapter 15\Model_04_ERoEI_estimates.py**

Параметр	Модель 1	Модель 2	Модель 3
ERoEI ₂₀₁₇	20	30	40
URR, млрд toe	1'000	1'400	3'300
σ	0.010	0.006	0.003
ERoEI при Q=1'000	1.1	1.8	8.9

Иллюстрация ERoEI(Q)



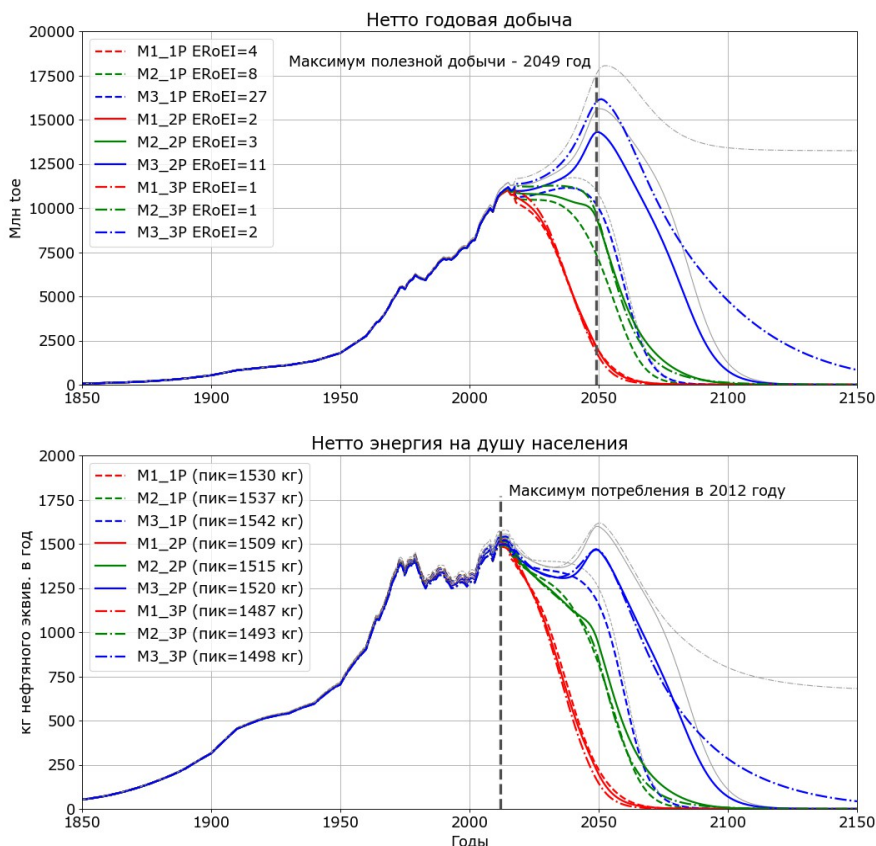
Далее на основании формул {15.9} и {15.10} приведём чисто качественную прикидку выхода полезной энергии из ископаемого топлива, используя в качестве входных данных гипотетическую модель «Полочка после пика», которая была представлена выше. Программа **Chapter 15\Model_05_Plateau_Per_Head_Production.py**

Три группы сценариев представлены цветом:

- С вероятностью около 10% начавшийся в 2012 году глобальный спад уровня жизни продолжится довольно быстрыми темпами – примерно по 5% в год – вплоть до 2050 года (красные линии). В 2050 году, при населении планеты от 9.0 до 10.6 млрд, уровень жизни будет соответствовать 1890 году, с потреблением порядка 200 кг нетто ископаемого топлива на душу в год, что соответствует 270 Вт мгновенной тепловой мощности. Электричество будет в каждом доме... примерно у 500 миллионов. Остальной мир можно не описывать – откройте вашу любимую книжку про пост-апокалипсис. Как примечание, вряд ли при продолжении спада по 5% в год применима плавная модель – скорее начнётся опережающее разрушение социальных институтов, как продемонстрировано в

гипотетической стране А из таблицы выше, и о чём так любит бляжить Гайл «Наше-всё» Тверберг²³¹.

Модель "Полочка добычи после пика, с учётом EROEI"



- Также с вероятностью около 10% никакого обвала не будет до 2049 года, а уровень жизни останется примерно там, где он был в последней четверти XX века (синие кривые). Пик добычи по полезной энергии происходит между 2040 и 2052 годами, наиболее вероятное значение – 2049 год, 14.0 млрд toe. При увеличении населения планеты мы увидим не 1.2 млрд систематически недоедающих, а 1.5 (из них примерно 800 млн в Африке), электричества в 2018 году нет у 800 млн, а в 2050 не будет у миллиарда. Читатель почти наверняка принадлежит к лучшей трети человечества, проживая в стране с «сильной экономикой». Если в 2018 вам стукнуло 40, можете особо не беспокоиться... О себе, но не о своих детях и внуках.
- Наконец, наиболее вероятный сценарий (зелёные кривые). 2050 год. «Сланцевые» компании, следуя правилу «~~улыбаемся и машем~~» «бурим, детка, бурим», продолжают делать в земле дырки, чтобы текло больше

231 <https://ourfineworld.com/author/gailtheactuary/>

нефти и газа. Всё бóльшая часть добытого тратится на бурение всё большего числа дырок. Качество угля упало с 0.5 toe/т до 0.3 (это лигнит!), но поезда везут добытое куда надо. Пик добычи нетто ископаемого угле(водо)родного топлива на душу населения прошёл в 2012 году на уровне 1'390-1'550 кг нефтяного эквивалента. Наиболее вероятное значение – 1'500 кг или 1.99 кВт тепловых. С тех пор происходит спад уровня жизни по 1.5% в год, что большинству населения не заметно: принцип лягушки в кастрюльке. Средний уровень жизни по планете – как в 1960 году. Это не значит, однако, что Америка будет жить как США образца 1960 года. Скорее Америка, Европа и Китай в среднем станут жить как КНР образца 2000 (то есть относительно неплохо, но далеко не на уровне потребления богатеньких американцев середины XX века). Африканский 1960 год наступит, как ни удивительно, в большинстве стран Африки, а индийский 1960 – в Индии, Пакистане и Бангладеш. Проверять опасно – а вдруг каннибализм? Природный газ – это не только электричество в розетке, но и удобрения, пестициды и прочая сельхозхимия; нефть – это не только «Формула-1», но и трактора.

Предвижу, что сторонники ВИЭ уже плотоядно потирают руки, собираясь обвинить автора в недооценке их любимых ветряков и солнечной панели. Для полноты картины следует добавить в графики все остальные источники индустриальной энергии, как мы это делали в главе 7.

Чтобы не обвинили в пессимизме, будем считать $ERoEI_{ext}$ для возобновляемых источников энергии на уровне 15:1 (у ветряков порядка 18, у солнечных электростанций – около 7), а для ядерной энергетики примем это значение как 10:1. Из 9 моделей выше будем рассматривать только 3: умеренно пессимистическую, среднюю и оптимистическую – остальные 6 моделей находятся в «коридоре» между пессимистической и оптимистической моделями, и для оценки несущественны.

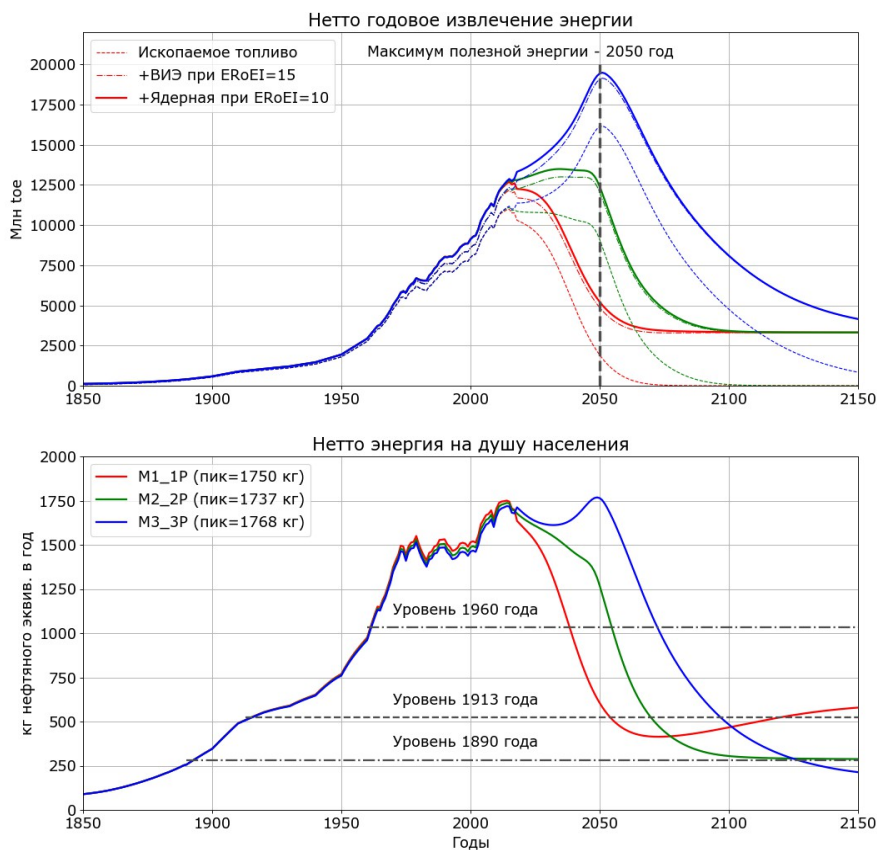
Опять-таки, чтобы не обвинили в излишнем пессимизме, пересчёт из тераватт-часов электрической энергии в тонны нефтяного эквивалента будем делать так же, как это делается у «BP»[10]. Один тераватт-час – $3.6 \cdot 10^6$ ГДж. Если считать по тепловой энергии, тонна нефти даёт 41 ГДж на тонну, то есть нужно всего 0.087 млн тонн нефти. «BP» по традиции считает в три раза больше: 0.227 млн тонн на ТВт·ч, молчаливо предполагая при этом КПД современной ТЭС или ТЭЦ (включая утилизацию вторичного тепла) на уровне $0.087/0.277 = 39\%$. Могут возразить, что у двигателей внутреннего сгорания (включая изготовление бензина) КПД несколько ниже; на это есть контр-возражение, что из природного метана или угля можно делать азотные удобрения, а из чистого электричества от ГЭС – затруднительно²³². Аналогично, тепловую энергию

232 Аммиак получают по процессу Губера – реакцией водорода и атмосферного азота. Теоретически водород можно добывать электролизом воды, а не из природного газа, как делается сейчас. На производстве тонны аммиака на современном заводе надо чуть более 1100 м³ природного газа (что соответствует 0.95 toe), либо 2'200 м³ водорода – эквивалент 11'000 кВт·ч электроэнергии «от ветряка». По коэффициенту «BP» – это более 3.0 toe.

газа и угля можно использовать и напрямую, например для поджаривания гамбургеров в забегаловке незабвенного Уильяма Харта из 1821 года.

Программа Chapter 15\Model_06_Plateau_Nuclear_and_Renewable.py

Модель с учётом EROEI, ВИЭ и ядерной энергии



В 2017 году в мире выработано (по данным «BP»[10]) 596.4 млн toe электроэнергии из ядерных реакторов, 918.6 млн toe гидро, 74.3 солнечной и 254.0 ветровой. Сжигание биомассы и всякие гео-термо-приливные прибамбасы дали ещё 132.6 млн toe. Из биомассы также было выработано 84.1 млн toe этанола и другого жидкого биотоплива. Итого от ВИЭ получено 1'460 млн toe, а ядерная энергетика добавила к этому ещё 40%. Число 2'060 млн toe, несомненно, впечатляет. Пока вы не сравните его с общей добычей нефти и газа (включая битум и жидкости): 7550 млн toe. Каменный уголь добавляет сюда ещё 3770 млн toe. Итого, по самым оптимистическим подсчётам, доля ядерных станций и ВИЭ в современной мировой экономике – менее 1/3, а производство ядерной и возобновляемой энергии на душу населения – всего лишь 273 кг нефтяного эквивалента в год.

Даже с наиболее оптимистическим сценарием развитием ВИЭ, обвал на

уровень потребления 1960 года неизбежен; это произойдёт где-то между 2038 и 2072 годами, наиболее вероятно (зелёные линии) – в 2054 году. Что существенно, в наиболее вероятном сценарии спад уровня жизни остаётся плавным и постепенным: примерно по 0.8% в год вплоть до 2045 года. Большинство населения в «развитых» странах успешно продолжает тянуть одеяло на себя, и принцип «лягушки в кастрюльке» сохраняется. Крупных социальных потрясений в этих странах не происходит, мелкие универсально замалчиваются, а государственные дефолты, кризисы и перевороты экспортируют в страны «недоразвитые». Доля возобновляемых в экономике плавно вырастает до $\frac{1}{3}$, о чём с упоением докладывают миру Перецы и прочие пропагандоны (не об уровне жизни же писать, в самом деле!)

Средний уровень жизни 1913 года может случиться на планете с 2053 по 2097 годы, наиболее вероятно – в 2070 году. Это два поколения, времени на подготовку достаточно. Среднее потребление энергии высокой концентрации составит 520 кг эквивалента на душу в год, это тепловая мощность 675 Вт, при доле ВИЭ около $\frac{2}{3}$. Следует признать, что с примерно с 2045 года гладкая модель вряд ли реализуется. Снижение уровня жизни с 2045 по 2070 годы в наиболее вероятной модели – по 4% в год, а это уже населению заметно. Представьте, что ваши дети должны жить в среднем как жила в молодости ваша бабушка!

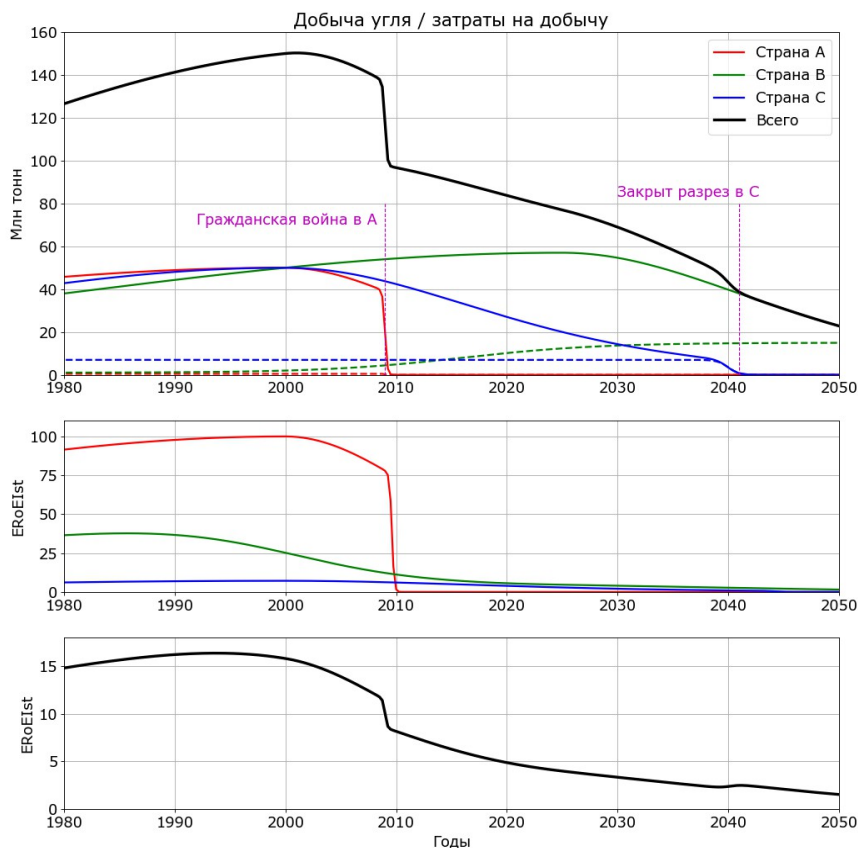
Тут, однако, самое время вспомнить о Гайл Тверберг с её критикой плавного решения Рандерса. Рассмотрим на той же модели гипотетических стран А, В и С. Нарисуем программой **Chapter 15\Model_07_Production_Decline.py**

Для простоты, пусть на островах А, В и С и континенте D проживает суммарно 100 млн человек, и население стабильно. Значит, в 2000 году на каждого жителя нашей учебно-тренировочной планеты приходилось, по формуле {15.9}, $(150-0.5-2-7)/100 = 1.4$ тонн нетто угля в год, то есть почти столько, как в среднем по стране В, примерно в 20 раз меньше, чем у угольных магнатов из С, и раз в тридцать больше, чем у нищего жителя страны А. У 89 млн жителей страны D, естественно, существует неравенство, но в среднем житель D потреблял в год $135.5/89 = 1.5$ тонны угля – точно, как в В. Согласно нашей гипотезе, и уровень жизни среднего гражданина D был примерно как в В.

В 2000 году суммарная добыча трёх стран – 150 млн тонн, а общий усреднённый $ERoEI_{st}$ по трём странам – около 16:1.

Теперь перенесёмся в условный 2008 – революция в А уже созрела, но пока не началась. Считайте, что низы уже не могут, но верхи пока хотят. Или наоборот, неважно. Общее производство угля на нашей учебной планетке – 140 млн тонн, нетто 128, душевое потребление с 2000 года плавно снижалось по 1.2% в год и в среднем по планете 1.28 тонны; в стране D – 1.39 тонны в год на душу. Народ в D почти ничего не заметил, не говоря уж о странах В и С, которым борьба голодающих пролетариев в А глубоко по барабану.

Гипотетические страны А,В,С



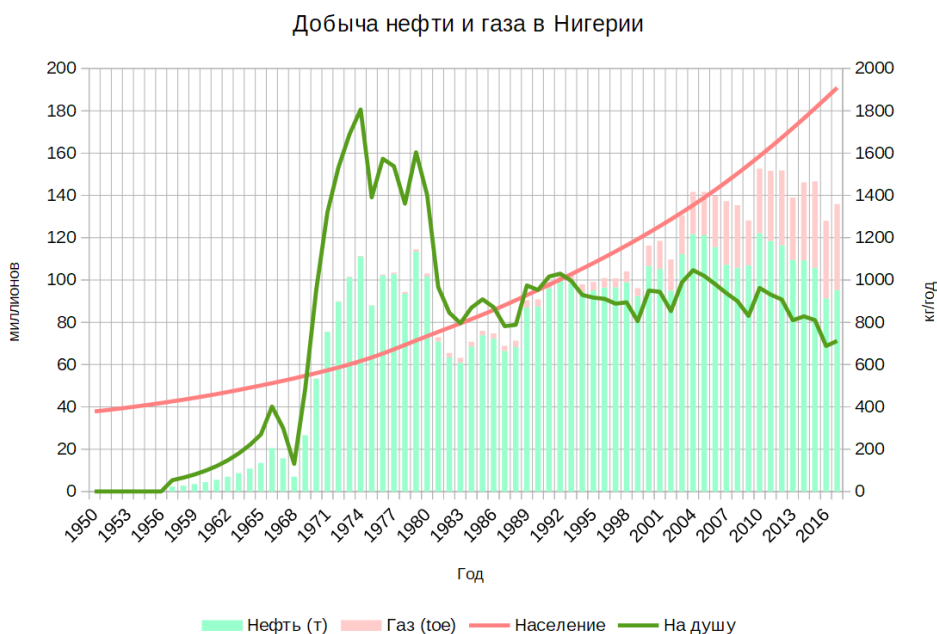
В 2009 году в стране А происходит революция, оттого наша мировая добыча падает за год примерно до 95 млн тонн, а общемировой $EROI_{st}$ при этом за два года скачком снижается с 12:1 до 8:1. В самой стране А показатель уже отсутствует, потому что потребление угля на нужды добычи прекратилось, как, собственно, и сама добыча. Ноль поделить на ноль – неопределённость!

Состояние дел в послереволюционном 2010 грустное: мировая добыча угля – 96.7 млн тонн (падение по 34% за два года). За вычетом потраченного на добычу остаётся 85 млн тонн, то есть по 0.85 тонны нетто на жителя планеты в среднем. В стране А... не будем о плохом. Нас интересует страна D, куда влилось 3 млн встреченных бронепоездами и гуманно нущенных на удобрения размещённых в лагерях для беженцев. Население D теперь – 92 миллиона, а на душу населения – всего 0.85 тонны угля. Уровень жизни за 2 года рухнул на 40%. Приведёт ли это к гражданской войне в D и, как следствие, голоду в странах В и С? Неизвестно. Вполне может получиться и так, что страна D введёт на остров А войска и кое-как восстановит часть добычи.

В 2041 году происходит плановое закрытие угольного разреза на острове С. «Мировая добыча» при этом довольно быстро снижается на 10 млн тонн, а вот $EROEI_{st}$... внезапно слегка увеличивается! Всё правильно: закрытие уже нерентабельного в 2040 году месторождения и должно приводить к улучшению экономических показателей. Никакого социального катаклизма, однако, не происходит. В 2041 году на острове С есть город-призрак, где вахтовым методом трудятся 500-600 человек; их семьи уже лет 10 как вывезены на «большую землю» D. Конечно, большинство из понаехавших из С живут не лучше коренного населения D: 230 кг угля в среднем на год.

Пример выше приведён не для того, чтобы конкретно предсказывать будущее саудовских нефтяных магнатов и китайских шахтёров из Шанси, а для математической иллюстрации положения Гайл Тверберг о том, что вызванное истощением месторождений *плавное* снижение добычи может приводить к экономическим либо политическим катаклизмам, а они, в свою очередь, приводят к *обвальному* снижению добычи. Далее возникает порочный круг: дальнейшее снижение добычи вызывает падение уровня жизни, дальнейшее обнищание – новые политические потрясения, и так далее.

Великолепный пример – Нигерия. Население стабильно удваивается каждые 27 лет. В 2017 году – 190.9 млн, в 1990 – 95.3, в 1963 – 48.0 миллиона²³³. Промышленная добыча нефти началась в 1957 году, пик по нефти и конденсату пройден в 2005, по сумме нефти и газа – в 2010.



²³³ Статистика ООН. Для сравнения, в 13 С-АШ с 1700 по 1860 годы получалось несколько быстрее: удвоение за 25 лет, см стр. 69.

Угля мало. Четыре гидростанции с установленной мощностью 2040 МВт (по состоянию на 2017 г) могли бы дать на душу населения целых 10.6 ватта (!) электричества, то есть 21 кг нефтяного эквивалента. Дали, правда, в районе нуля, так как линии электропередач непрерывно срезают для отправки алюминия в Китай. Контракт с китайской «Синогидро» по постройке ГЭС Мамбилла был разорван в 2013 году после того, как местные борцы за свободу захватили и вероятно обезглавили 10 китайский специалистов²³⁴.

Нефтедоллары тратятся на вооружение банд; к каждому инженеру с карандашом теперь надо приставить правительственного солдата с «Калашом», а вдоль нефтепроводов регулярно гонять бронетранспортёры. Значит, увеличиваются затраты. Умные инженеры ехать в страну опасаются, приходится довольствоваться специалистами второсортными, что технические решения, натурально, не улучшает. В Нигерии уже несколько раз и боевики, и взбунтовавшиеся бравые полковники захватывали нефтеналивные терминалы и вежливо просили у правительства «ну там скинуться и помочь кто чем может». Можно грубо оценить $ERoEI_{\text{роу}}$ на уровне где-то между 5:1 и 10:1.

Добыча нефти и газа на душу населения в Нигерии уже снизилась до 700 кг нефтяного эквивалента, а с учётом $ERoEI_{\text{роу}}$ получается между 560 и 630 кг нетто, то есть втрое ниже, чем у среднего землянина. Практически вся не использованная для содержания и защиты нефтяной инфраструктуры нефть идёт на экспорт в обмен на ~~зеркальца и бусы~~ продовольствие и оружие. Индекс гуманитарного развития – 0.532 (147 место в мире). Страна – член ОПЕК, мля.

Шестьсот килограмм нефтяного эквивалента в год – это 800 Вт мгновенной мощности; вместе с местными огородами и лесоповалами получается порядка 1.0-1.2 кВт на душу, что соответствует уровню жизни швейцарского лесоруба из 1700 года. Конечно, лесоруб был тёмный, не цивилизован, про бананы, мобильные телефоны и Калашникова ничего не знал, а из-за более сурового климата тратил куда больше дров на обогрев жилища. Зато у него под окнами гораздо реже стреляли.

Замкнутый круг: *снижение $ERoEI$ вызывает снижение уровня жизни*, затраты вверх, эффективность вбок, а $ERoEI$ продолжает падать.

Вам нравится такое объяснение? Мне – не очень. Попробуем переписать этот абзац другими словами:

Замкнутый круг: в связи с *истощением месторождений, добыча плавно снижается*, что при постоянной высокой рождаемости вызывает *постепенное снижение уровня жизни*. Рано или поздно снижение уровня жизни приводит к социальной напряжённости, что, натурально, приводит к *скачкообразному росту затрат на добычу*. Добыча плавно вниз, затраты резко вверх,

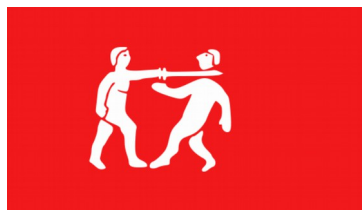
234 Hugo Foster et al, **NIGERIA: ESCALATION OF BOKO HARAM THREAT**, 2014. Скачано с <https://cdn.ihs.com/www/pdf/IHS-Nigeria-Boko-Haram-Threat.pdf>

эффективность куда-то вбок, как следствие уровень жизни и далее вниз. Может возникнуть ситуация, когда система катастрофически (скачкообразно) разрушится.

Как видим, герой этой главы для объяснения ситуации в Нигерии совсем не нужен. ERoEI – это просто технический показатель, отражающий увеличение затрат при снижении добычи ресурса. Примерно так же мы бы сказали, что «в стране Z гражданская война оттого, что отношение государственного долга к ВВП стало хуже». График роста госдолг/ВВП полезен для понимания скорости процесса, но надо всегда говорить о факторах, приведших к падению ВВП и/или к росту долга.

Если же говорить о конкретной Нигерии, то причиной существующей ситуации является: «5.53 родов на женщину»²³⁵. В переводе с международно-банковского на человеческий это значит: «90% живущих в 2016 году женщин старше 36 лет рожали 9 и более раз». Ну и эффективность современной медицины, если на то пошло, хотя с прививками от полиомиелита страна в начале XXI века успешно боролась и вроде почти поборола²³⁶. К геологии это никакого отношения не имеет.

Если вы полагаете, что в Нигерии – хана и ужас, обратите внимание на их западного соседа – Бенин. Вообще-то королевство Бенин находилось поначалу на севере Нигерии, а на государственном флаге этой добросердечной и мягкой страны был изображён правозащитный, исполняющий мечом декапитацию безоружного унтерменша (вероятно, неверного). Доупражнялись с мечами до того, что в 1897 специальная британская карательная экспедиция королевство зачистила в ноль, а столицу и флаги сожгла дотла. Современная республика Бенин (бывшая Дагомея) получила независимость от Франции в 1960 и успела даже немножко строить коммунистическое грядущее – с 1975 по 1990 годы. В 1990 весь социализм кончился (с чего бы это?) В 2004 в Бенине ВНЕЗАПНО кончилась нефть! Правда, в отличие от Нигерии, много нефти в Бенине не было: на пике добычи в 1985 страна производила всего 400 тыс тонн в год. Сейчас HDI в республике – 0.515, а минимальное количество нефтепродуктов 11±1 млн жителей получает из Нигерии. Плюс-минус миллион – не описка. Многие жители не знают, что надо где-то зачем-то регистрировать роды и смерти. По данным американского DOL, до 15% детишек в возрасте до 5 лет вообще не отражены в статистике, а 680 тыс детей в возрасте от 5 до 14 лет работают наравне со взрослыми, не посещая школу²³⁷.



С севера с Нигерией граничат ещё две весёлые страны: Нигер и Чад, с HDI 0.354 (самый низкий из 189 стран, где этот показатель вообще можно

235 World Bank, <https://data.worldbank.org/indicator/SP.DYN.TFRT.IN>

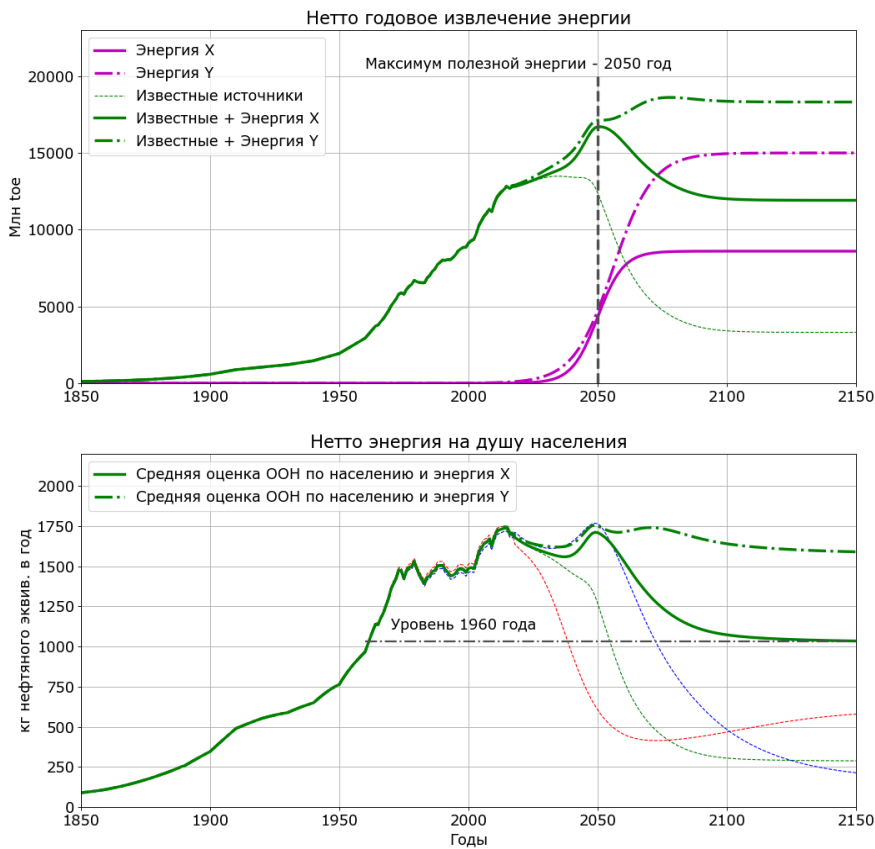
236 Cecilia Chen, *Rebellion against the polio vaccine in Nigeria: implications for humanitarian policy*, African Health Sciences. 2004 Dec; 4(3): 205–207.

237 <https://www.dol.gov/agencies/ilab/resources/reports/child-labor/benin>

подсчитать) и 0.404 (186 место в мире) соответственно. На восток от Нигерии – Камерун с HDI 0.556, далее через границу – Центрально-Африканская республика с HDI 0.367 (почётное 187 место в мире). Добыча нефти в Камеруне прошла пик в 1985 на уровне 9 млн тонн в год. В 2017 добыли всего 4 млн тонн, при этом население за то же время выросло с 10 млн до 24.1 ± 0.5 млн.

Как-то не хочется, чтобы наши внуки в 2070 году жили как в Нигерии конца XX века, оттого попробуем соорудить ещё пару моделей. Первая модель вводит «энергию X», а на роль X можно выбрать (пока) реакторы-бридеры или термояд по вашему вкусу. Другие известные науке источники мы уже учли. Программа **Chapter 15Model_08_Energy_X.py**

Модель с добавкой "Энергии X"



Предположим, поставлена задача удержать цивилизацию не ниже уровня потребления 1960 года. Тогда с 2025 по 2075 надо увеличить производство «энергии X» до 8'600 млн toe в год (тепловых). Энергоблок типа РБМК-1000 (того самого, который случайно) вырабатывает 1 ГВт электрической мощности или 3.2 ГВт тепловой. Последнее значение соответствует 2.5 млн toe в год. С учётом того, что реакторы надо обслуживать, а $EROI_{st}$ (оптимистично) 10:1,

потребуется $8'600/2.5/0.9/0.9 = 4'250$ энергоблоков, или более тысячи АЭС с мощностью как Чернобыльская (там было четыре реактора). Каждый год надо строить по 85 энергоблоков; и после 2075 года строить дальше, ибо новые реакторы понадобятся взамен изношенных. Если население Земли – 10 млрд, на каждые 2.35 миллиона народа надо энергоблок. В той же Нигерии, на 620 млн народу²³⁸ придётся построить 65 эквивалентов Чернобыля.

Могут возразить, что поровну всем не надо. Пусть в новом удивительном мире 3 миллиарда потребляют по 3 тое в год на человека, а остальные 8 миллиардов – как получится, как бы грустно им ни было. Ну что же, грустно остальным и будет! По $(1000 \cdot 11 - 3000 \cdot 3) / 8 = 250$ кг эквивалента на душу. Тогда в Нигерии за 50 лет надо построить не 65 Чернобылей, а всего 30 – по три ЧАЭС за пятилетку. В России, с населением 140 млн, для достижения вождельных 3 тое, надо запускать каждые 2 года по 7 «энергоблоков Х». Заметим, что РБМК тут просто для масштаба величин. Энергетическая цепочка реальных реакторов на быстрых нейтронах наверняка получится гораздо сложнее – поглядим на чудеса техники: пущенный на Белоярской АЭС в 2015 году БН-800 и строящийся там же БН-1200 – оба с натриевым теплоносителем. Насколько сложны реакторы термоядерные – пока рано обсуждать.

В КНР в 2016 пущено 4 реактора общей мощностью 3.6 ГВт электрических, в 2017 – 2 реактора (2 ГВтЭ), в 2018 вроде будет целых 7 (7.75ГВтЭ). Опять-таки, речь пока о «классических» водо-водяных реакторах на обогащённом уране, а не о бридерах и тем более не о термояде. По нашей «программе минимум» в Китае надо строить «всего» по 35 «энергоблоков Х» в год.

Программа максимум – удержать среднее мировое потребление энергии высокой концентрации на уровне свыше 1'500 кг нетто условной нефти на душу. Тогда общее количество реакторов – $15'000/2.5/0.9/0.9 = 7'400$ (штрих-пунктирная линия на графике с обозначением «энергия Y»), а на планете надо строить по 150 «гигаваттников» ежегодно. Но и жизнь в странах «третьего мира» получается послаще: 1.08 тое на нос, почти вдвое больше, чем сейчас в Нигерии.

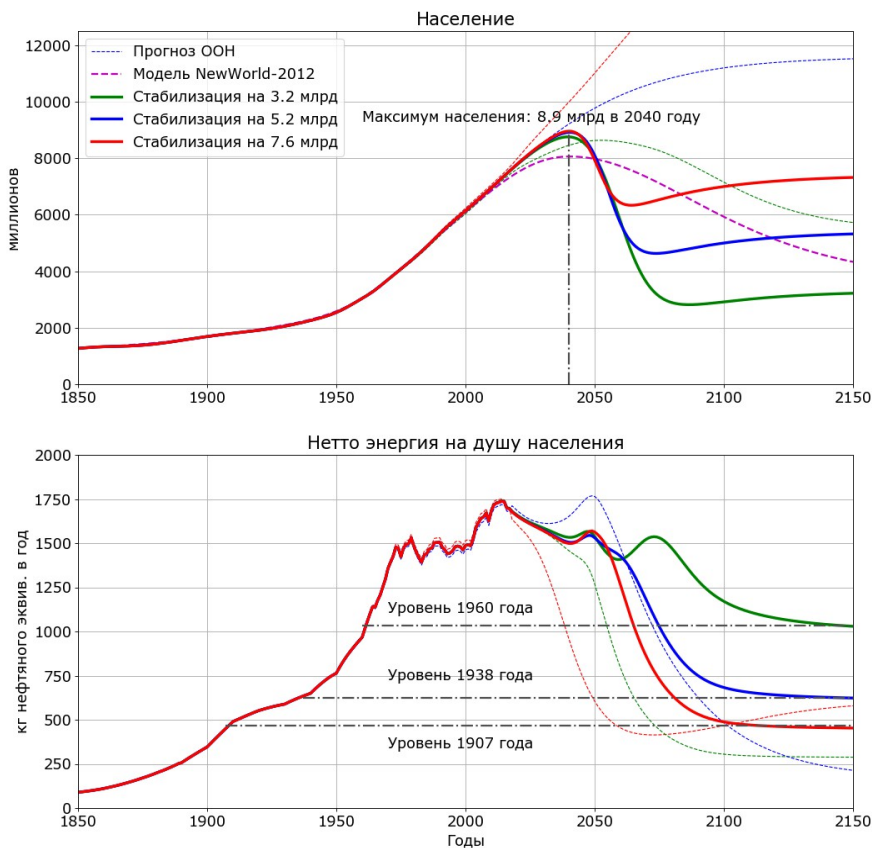
Почти нет сомнений, что в развитых странах массовое строительство бридерных АЭС организовать можно, но что делать со странами недоразвитыми? Опыт показывает, что даже эксплуатация ГЭС там небезопасна, а вы хотите дать террористам возможность захватить АЭС и понаделать короткоживущих изотопов для «грязных бомб»? К тому же, с нефти жители имеют по 600 кг эквивалента на нос, а с АЭС – всего 250. Не увеличится ли число желающих обвязаться динамитом?

Второй вариант «спасения цивилизации» – уменьшение рождаемости с плавным сокращением населения, так, чтобы «безопасной» возобновляемой

²³⁸ Это не шутка, а прогноз ООН на основании оценок, предоставленных правительством Нигерии. По их мнению, в Нигерии 2075 года будет жить от 500 до 760 млн человек, а на душу населения приходится ровно 15 соток территории страны (которая, несомненно, к тому времени станет цветущим ~~маркизом-де~~ Садам).

энергии из ГЭС, ветра, солнечных батарей и прочих приливов хватило всем. Подсчитаем программой **Chapter 15\Model_09_Population_Z.py**

Модель с сокращением рождаемости "Население Z"



Для сравнения показано малиновым пунктиром раскритикованное Тверберг «плавное» решение Йоргена Рандерса[18] из главы 7. В нашей модели вероятное сокращение популяции начинается в том же 2040 году, однако максимум на 0.8 млрд выше. После этого возможны несколько сценариев: в базовой модели среднее потребление падает на уровень конца Великой депрессии – 725 кг/душу, а население стабилизируется на уровне 5.3 млрд. Примерно два миллиарда живёт как современные китайцы на уровне 1'300 кг в год, остальные имеют по 375 кг (и бесплатные бананы). Если население снизится до 3.2 млрд, есть надежда удержать цивилизацию не ниже уровня 1960 года. Если же пытаться стабилизировать население на уровне свыше 7 млрд, то сваливание на уровень жизни начала XX века неминуемо.

Подведём итоги главы:

- Реалистические модели не должны включать обвального сокращения

добычи полезных ископаемых «в ноль за два года». В пределах одной страны или одного месторождения это вполне возможно, но по общей сумме в мире – крайне маловероятно. Нужен природный катаклизм масштаба удара сверхкрупного астероида, а в этом случае полезные ископаемые ~~землей~~ людей интересовать уже не будут. Наибольшая скорость спада добычи нефти зафиксирована в Израиле – 98% в год. Типичное значение – 1.5%.

- Рассмотрен один из любимых показателей «Нефтепикников» – ERoEI. Продемонстрировано, что все считают его по-разному, часто получая результаты, отличающиеся на порядок величины. Приведено 6 формул для подсчёта 4 версий ERoEI: «стандартного», «транспортного», «потребительского» и «социального». ERoEI можно считать и через денежную стоимость – получается значительно проще, но не точно. В качестве полезного совета, если ваш оппонент начинает оперировать понятием ERoEI, спросите у него, какой конкретно ERoEI имеется в виду. Если оппонент затрудняется назвать конкретную методологию подсчёта, полезнее и интереснее будет спорить о точном количестве ангелов/чертей на кончике швейной иглы.
- Показано, что по мере истощения месторождений энергетических полезных ископаемых $ERoEI_{st}$ снижается; развитие технологий добычи, перевозки и обогащения/переработки ресурсов может временно повышать $ERoEI_{rou}$ и $ERoEI_{ext}$.
- В 2014 году Джессика Ламберт со товарищи предложила коррелировать социальный $ERoEI_{soc}$ с индексом человеческого/гуманитарного развития HDI. Из статей Ламберт по Интернету пошла гулять специальная ~~олимпиада~~ версия пирамидки Маслоу, где уровню $ERoEI_{soc}$ сопоставляется развитие науки, медицины, образования, и т. д. Мы поставили мысленный эксперимент, который подход Ламберт полностью опровергает. Уровень жизни гораздо лучше коррелирует с добычей/использованием ресурса на душу населения (что, впрочем, замечает и сама Дж. Ламберт).
- Из четырёх версий для моделирования полезны только $ERoEI_{rou}$ и $ERoEI_{ext}$. «Стандартный», вероятно, может быть интересен в пределах индивидуальных месторождений, но считать затруднительно. Методика подсчёта $ERoEI_{soc}$ через ВВП – слишком ненадёжна.
- Сравнение стран и территорий «по ERoEI» – бессмыслица. Низкий ERoEI не означает низкого уровня жизни или социальной нестабильности, а высокий ERoEI не гарантирует от социальных потрясений. В конкретных условиях конкретной страны снижение ERoEI приводит к снижению уровня жизни, но абсолютная величина показателя никакой роли не играет.

- Нами высказано предположение, что из-за уменьшения $ERoEI_{ext}$ (вследствие выработки месторождений) падение уровня жизни будет происходить быстрее, чем снижение добычи; скажем, если мировая добыча падает по 1% в год, полезная энергия снижается по 1.5%. Существует период, когда абсолютная добыча растёт, а полезная (нетто) энергия уменьшается. В этой модели уровень 1960 года в среднем по планете будет достигнут между 2032 и 2070 годами, наиболее вероятная оценка – 2050.
- Добавление в модель возобновляемой и ядерной энергетики, при самых оптимистических предположениях отсрочит наступление «нового, 1960 года» до 2038 или 2072 годов, наиболее вероятно – в 2054 году. Вся зелёная и все ядерные дают всего лишь 4 года отсрочки, однако позволяют избежать обвала в ноль во второй половине XXI века.
- Удержать цивилизацию выше уровня 1960 возможно, но потребует либо массового – пара тысяч электростанций – внедрения новых источников энергии (пока единственный достойный кандидат – реакторы-бридеры), либо сокращения населения планеты до порядка 3 млрд человек. По-видимому, оптимальное решение находится где-то посередине.
- Расчёты выше приведены не для каких-то особых предсказаний, а с целью показать, что ситуация с ископаемым топливом не так печальна, как представляют хардкорные «Нефтепикники», но и не такая радужная, как воображают «Корнукопианцы». В любой публикации по пик нефти в комментариях можно прочесть с одной стороны «~~неее~~ пик пришёл, всё пропало, мы все умрём», а с другой: «будем бензин из угля делать, на тысячу лет хватит». «Хватит», вероятно (и при благоприятном раскладе), на одно поколение – до 2045 года. Дальше будет слегка нерадостно, и хватать будет уже далеко не всем. Лишние самовыпилятся, но цивилизация выживет, и каменный век не наступит.