



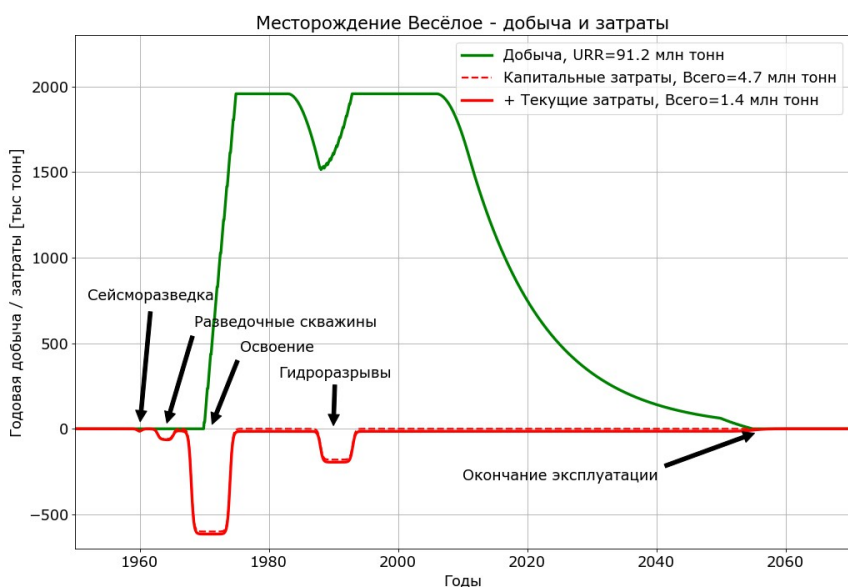
Глава 16.

Акулий плавник.

— Леги и джентльмены, — прозвучал голос из радиоприёмника — чёткий, спокойно-неумолимый мужской голос, совсем непохожий на те, что звучали в эфире уже много лет, — мистер Томпсон сегодня не будет говорить с вами. Его время истекло. С этого момента время принадлежит мне. Вы собирались выслушать сообщение о глобальном кризисе. Именно его вы сейчас и выслушаете.

— Айн Рэнд «Атлант расправил плечи»

Существует ещё одна причина, отчего модели с использованием ERoEI могут отклоняться от реальности. Формула {15.9} предполагает, что затраты энергии происходят одновременно с извлечением ресурса. Во большинстве случаев это не так, что мы продемонстрируем программой **Chapter 16\Model_01_Field.py** на примере знакомого нам нефтяного месторождения Весёлое из главы 8:



На графике показана добыча из месторождения, а также затраты, пересчитанные в тонны условной нефти. Расходы бывают разные. Пунктирной линия — капитальные затраты, то есть потраченное на разведку, освоение месторождения и интенсификацию добычи вместе с капремонтом скважин. Сплошная красная линия добавляет сюда текущие эксплуатационные расходы. За время существования типичного месторождения капитальные затраты примерно втрое превышают текущие расходы; при этом капитальные затраты происходят неравномерно и начинаются ещё до добычи.

Аналогичная картина наблюдается и с любыми другими источниками энергии: например, сначала вы в течение 5 лет тратите \$5 млрд на строительство ГЭС

или АЭС (ну или «ветровой фермы», если вам больше нравится), а потом лет 20-30 потихоньку отдаёте кредиты. Основные затраты на постройку станции происходят заведомо до начала производства электроэнергии, а во время эксплуатации станции текущие расходы относительно невелики. Любители насчитать для гидроэнергии ERoEI в районе 500 забывают, сколько энергии потрачено на бетон, сталь, топливо для самосвалов, производство турбин и генераторов, и так далее.

ERoEI отлично описывает текущие расходы, но плохо учитывает капитальные затраты. Бухгалтеры применяют математический трюк – амортизацию (depreciation), раскидывая капитальные затраты на сколько-то лет, чтобы вычитать из прибыли и меньше платить налогов, но нас-то волнуют не налоги, а физический поток полезной энергии!

В 2011 году Пол Пукайт выпустил книгу под названием «Таинственная бочка²³⁹ нефти»[31], и оттуда по веб-ресурсам отправилось гулять несколько интересных графиков. Первая часть книги посвящена попыткам количественной оценки пика нефти и скорости спада добычи. Сам автор пришёл в оценку запасов нефти из прикладной физики; он занимался сверхчистыми кристаллами и полупроводниками, оттого взгляд на энергетику немного «со стороны».

Первые пять глав рекомендуется смело пропустить – там автор пытается строить модель дисперсии нефти от времени и распределения запасов в больших и малых месторождениях. Проскакивают заявления типа:

In a global context and given enough time, this simple kinetic flow model would eventually grow to such an extent that a single large reservoir would engulf the entire world's reserves.

Если дать достаточно времени, эта простая модель кинетического потока в конечном итоге соберёт всю нефть планеты в одно гигантское месторождение, включающее в себя все запасы планеты [стр 38].

Главной посылкой автора является то, что распределение нефти по месторождениям следует формуле вероятности:

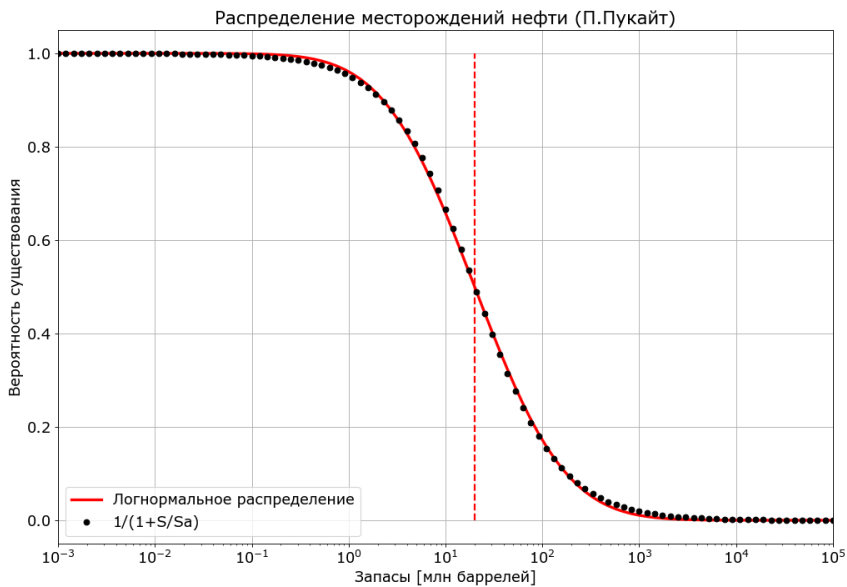
$$\rho(q) = \left(1 + \frac{q}{\bar{q}}\right)^{-1} \quad \{16.1\}$$

Где $\rho(q)$ – вероятность существования месторождения с извлекаемыми запасами более q , \bar{q} – нормировочный коэффициент, имеющий физический смысл «среднего размера месторождения». В подсчёте запасов геологи (тот же Ж.Лагеррер) уже давно используют логнормальное распределение:

$$\rho(q) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \operatorname{Erf}\left(\frac{\ln(q) - \ln(\bar{q})}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right) \quad \{16.2\}$$

²³⁹ Непереводаемая игра слов. Английское название книги «The OIL ConundRUM». «Conundrum» – это «загадка», а «DRUM» – это «бочка». Последняя редакция – декабрь 2014 года.

Функция {16.1} есть не что иное, как версия функции {16.2} для нищесбродов, так и не купивших себе «маму» на процессоре Пентиум. На деле логнормальное распределение работает не только для нефти и газа, но и для полезных ископаемых совершенно нетекучих, таких как каменный уголь или коренные золотоносные жилы. Типичным распределениям ловушек нефти и газа по размеру посвящены целые монографии²⁴⁰, и вдаваться в подробности в данной книге неуместно. Достаточно упомянуть, что геологические тела зачастую описываются фракталами, а размерность элемента фрактала зачастую следует логнормальному распределению. Числовой пример ниже показывает, отчего не следует придавать особого значения типу функции. Логнормальное распределение сделано для $\sigma=1.8$ и $q=20$ млн баррелей.



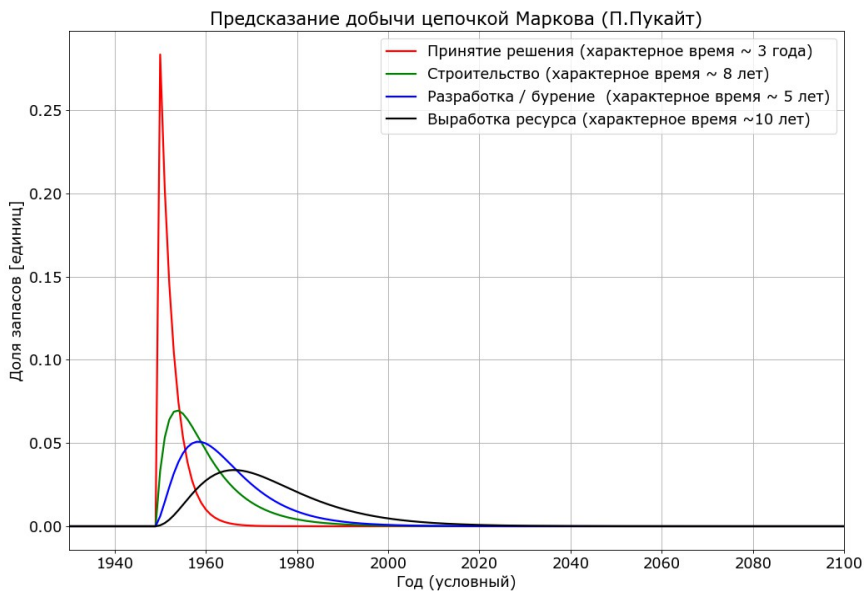
Пукайт резонно предполагает, что каждое открытое месторождение проходит через несколько стадий. Решение о начале разработки могут принять немедленно после открытия, а могут и позже. Пусть вероятность перехода запасов из категории «открытые» в категорию «открытые и одобренные к разработке» описывается функцией:

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right), t \geq t_0 \tag{16.3}$$

Где:
 ρ – вероятность принятия решения в год **t** ;
 t_0 – год открытия;
 τ – характерное время принятия решения;
 ρ_0 – нормировка, чтобы сумма вероятностей была равна единице.

240 Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press; 1 edition (January 11, 1990), ISBN 978-0195050134.

Для примера проиллюстрируем функцию {16.3} программой **Chapter 16\Model_03_Markov_Chain.py** . Пусть в условном 1950 году открыто 100 месторождений. Тогда решение о добыче из 28 месторождений будет принято в том же 1950, 20 месторождений будут дожидаться 1951 года, 14 месторождений – 1952 года, и последнее решение будет принято в 1960 году (красная кривая). Почему решение о разработке откладывается? Причин может быть масса: от всеобщего экономического кризиса до конкретного географического положения – скажем, какие-то месторождения находятся в странах из «списка Чуковского», и инвестировать туда опасно.



Теперь из категории «открытые и одобренные к разработке» месторождения надо перевести в категорию «готовые к бурению». На некоторых месторождениях это делается почти мгновенно – решили и сразу начали бурить. На других месторождениях надо сначала утвердить проект, подготовить площадки, отсыпать дороги, проложить трубопроводы, построить морские платформы и заводы для подготовки нефти, и так далее. Распределение вероятностей будет описываться той же формулой {16.3}, только с другим τ . Общая вероятность превращения месторождения в «готовое к бурению» выражается свёрткой²⁴¹:

$$\rho = \rho_1 * \rho_2 = \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \int_{x=t_0}^{x=t} \exp\left(-\frac{x-t_0}{\tau_1}\right) \exp\left(-\frac{t-x-t_0}{\tau_2}\right) dx \tag{16.4}$$

Раз мы выбрали экспоненты, то свёртку можно решать аналитически²⁴², но нам

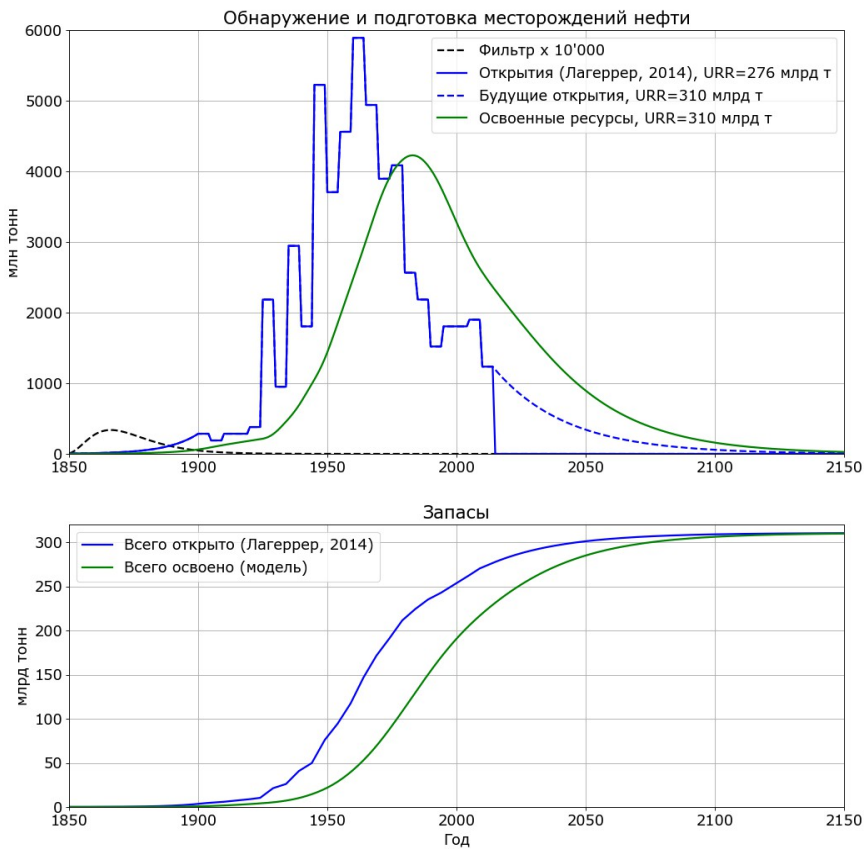
241 Напомним, что свёртка в этой книге применялась и ранее: в главе 9 мы считали при помощи свёртки накопление углекислоты в атмосфере (формула {9.3}), а в главе 10 мы численно воспроизводили расчёты университета Райса для добычи из газового месторождения Барнетт.

242 Аналитическое решение для модели Пукайта {16.5} в упрощённом частном случае распределения запасов {16.1} представлено в книге. Это решение – специальная функция и носит название функции

это не особо надо – достаточно численного эксперимента. После свёртки получается зелёная кривая: из 100 открытых месторождений всего 3 немедленно готовы к бурению в 1950 году, 7 месторождений готовы к буровым работам в 1953, и так далее.

Свёртку {16.4} надо повторить ещё дважды: для бурения ($\tau_3 = 5$ лет) и для добычи ($\tau_4 = 10$ лет). Получилась чёрная кривая, сильно похожая на кривую Вейбулла {8.3}, а сам метод последовательных свёрток в математике носит название «цепочки Маркова», по имени Андрея Андреевича Маркова-старшего (1856-1922). Если есть желание, кроме бурения и добычи можно добавить ещё фильтры: перевозку, переработку в бензин, логистику нефтепродуктов в танкерах и даже задержку в стратегических резервах. Получится чуть более плоская кривая, это несущественно.

Алгоритм "Нефтяной шок" (П.Пукайт)



Теперь тупо применим полученный фильтр к кривой открытий, собранной по данным Ж.Лагеррера из его же доклада 2014 года²⁴³. Свёртку

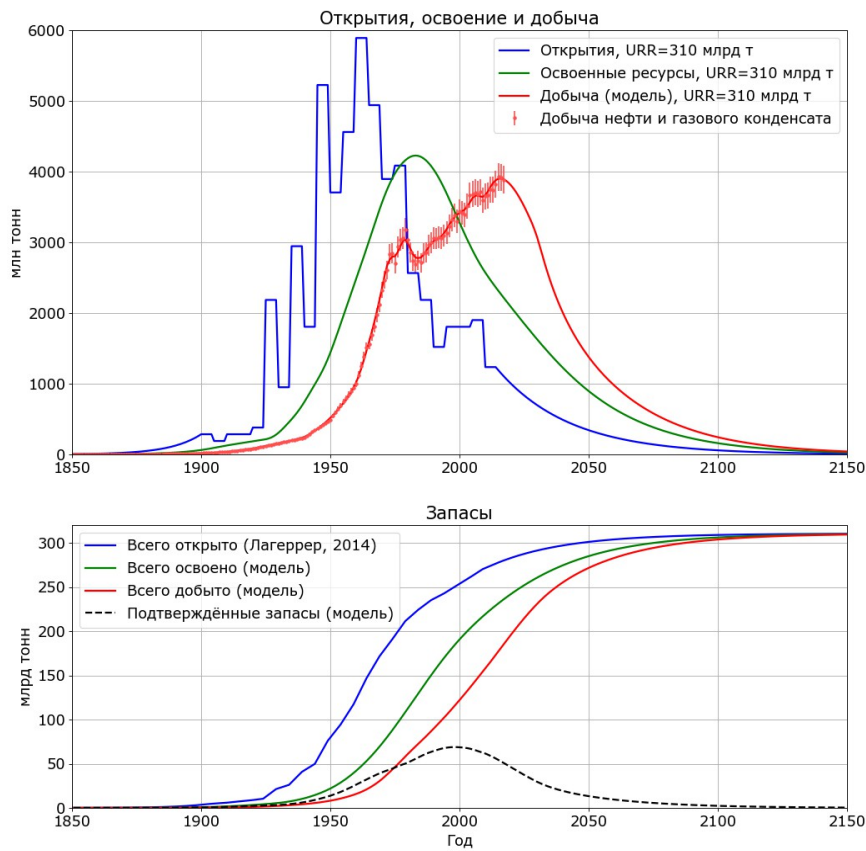
Гомперца (1779—1865). Обсуждение аналитического решения интересно, но выходит за рамки нашей дискуссии.
243 Jean Laherrere *The end of the peak oil myth*, ASPO France, 2014
http://aspoFrance.viabloga.com/files/JL_MITParis2014long.pdf

16\Model_04_OIL_ConunDRUM_1.py

Пик открытий пришёлся на начало 1960-х – тогда открывали по 6 млрд тонн нефти в год. Пик освоения месторождений (примерно по 4 млрд тонн в год)–середина 1980-х. Действительно, тогда интенсивно осваивали по всей планете: от Северного моря до Вьетнама; активно искали и бурили и СССР, и страны ОПЕК. Спад после 1985 года из-за того, что открывают всё меньше новых месторождений – постепенно становится нечего осваивать.

Получив плавную кривую освоенных ресурсов, Пукайт использует стандартную модель для описания добычи, как показано программой Chapter 16\Model_05_OIL_ConunDRUM_2.py

Предсказание алгоритмом "Нефтяной шок" (П.Пукайт)



$$\frac{\partial Q_{reserves}}{\partial t} = q_{available}(t) - Q_{reserves}(t) \cdot s(t)$$
$$q(t) = \frac{\partial Q_{produced}}{\partial t} = Q_{reserves}(t) \cdot s(t) \tag{16.5}$$

Здесь:

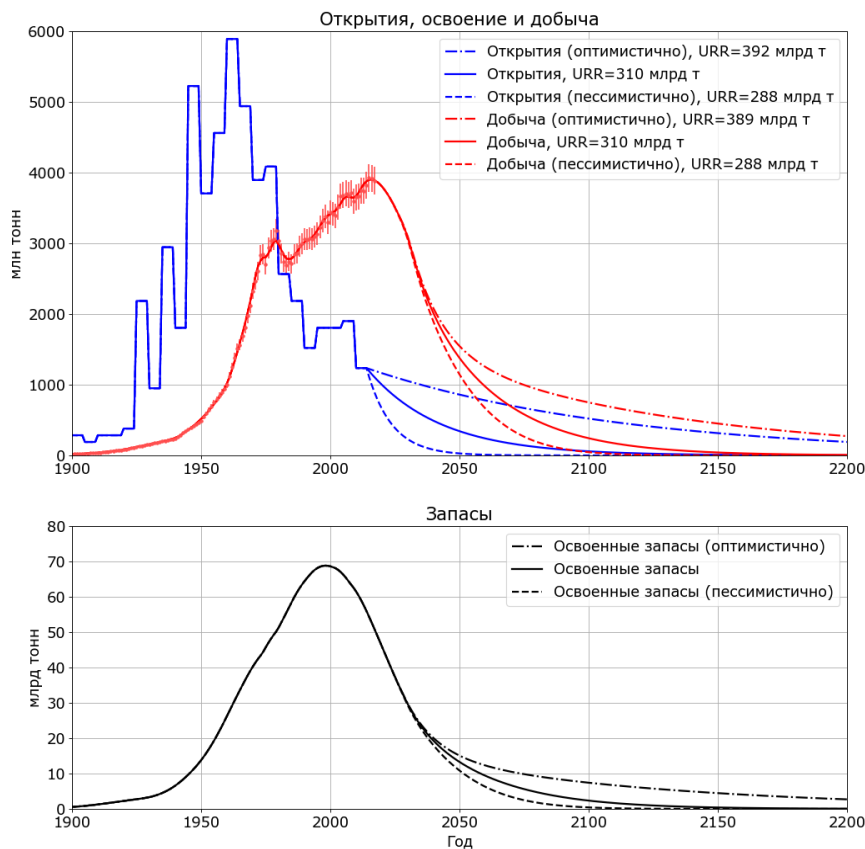
$Q_{reserves}(t)$ – подтверждённые остаточные извлекаемые запасы в год t ;
 $q(t)$, $Q_{produced}(t)$ – годовая и накопленная добыча;
 $q_{available}(t)$ – добавка открытых и освоенных месторождений (внешняя функция);
 $s(t)$ – фактор использования запасов (отношение текущей добычи к освоенным ресурсам) (внешняя функция).

Никакой магии тут нет. Кривая открытий скачет вверх-вниз – геологическая удача переменчива, год на год не приходится. Цепочка Маркова делает из скачущей кривой сглаженную колоколообразную – нечто среднее между степенной хаббертианой {8.5} и гауссианой {8.7}. Далее доктор Пукайт (или ваш покорный слуга) гнёт эту сглаженную кривую как хочет, задавая произвольную внешнюю функцию $s(t)$. В книге Пукайта кривая задаётся так:

Период:	Фактор $s(t)$:	Оправдание:
С 1850 по 1973 годы	6.0%	Просто так
С 1974 по 1980 годы	5.1%	Последствия нефтяного эмбарго 1973 года
С 1981 по 1984 годы	Линейное снижение с 5.1% до 3.4%	Последствия Иранского кризиса 1979 года
С 1984 по 1990 годы	3.4%	Глобальная рецессия второй половины 1980-х
С 1990 по 1992 годы	Линейное снижение с 3.4% до 3.0%	Первая война в Ираке
С 1993 года до конца модели	3.0%	Экстраполяция последнего выбранного значения

Автор этой книги добавил ещё точек (всего их получилось 22): с 1880 по 2030 годы $s(t)$ колеблется в пределах от 3.1% (перед Первой мировой) до 10% в 2030 (произвольно выбранное значение для подгонки добычи 2016 и 2017 годов). В качестве дополнительных событий выбраны: Первая мировая война, Великая депрессия, Вторая мировая, «космическая гонка» (ну или Холодная война, если вам такое имя больше по душе), развал СССР и далее СНГ, кризис «дот-комов» 2000 года и, натюрлих, наш родимый Глобальный Финансовый. То, что модельная кривая чётко следует реальным историческим данным по добыче нефти, – не свойство модели, а просто *хорошая подгонка*. Форма кривой после 2014 года целиком и полностью зависит от суммы всех открытий. Если вы берёте данные Лагеррера, то получается чуть круче, а если (вероятно завышенные) данные «Шелл» – чуть положе.

Второй важный фактор – ваши взгляды на будущие открытия нефти. В модели выше предполагается спад открытий по 3.5% за год. Попробуем два варианта: оптимистический, со спадом по 1%, и пессимистический – спад по 10%.



Интересно наблюдать, что от будущих открытий положение дел вплоть до 2050 почти никак не меняется! По факту пик добычи сырой нефти и конденсата – твёрдый битум и почти газообразные ШФЛУ мы тут не считаем – прошёл в 2015 году, тогда было около 3'930 млн тонн²⁴⁴. Так вот: и при оптимистических, и при пессимистических предположениях в модели происходит спад добычи нефти с 2015 по 2050 годы в среднем по 3% в год! Разницу почувствуют наши внуки в 2075.

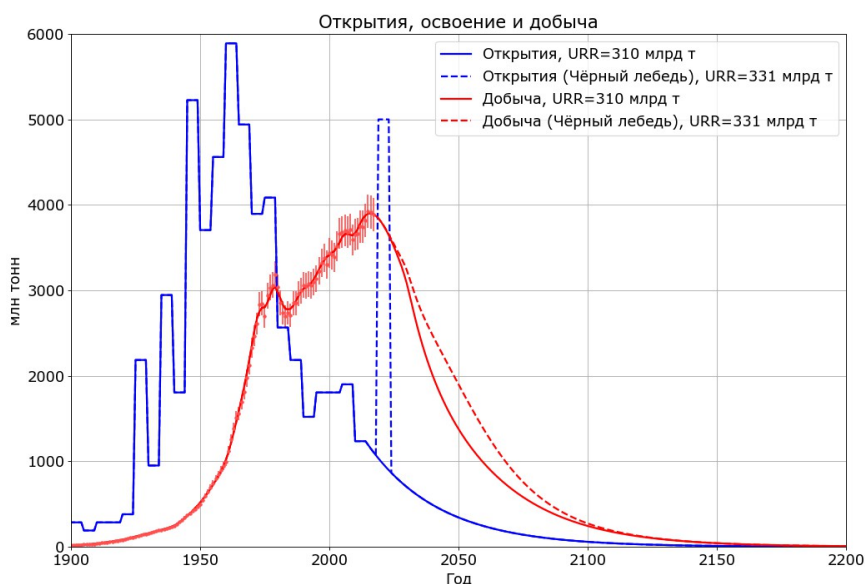
Что будет, если прилетит «чёрный лебедь», как описано в книжках у Нассима Николя Талеба²⁴⁵, и в пятилетку 2019-2023 годов человечество станет открывать на абсолютно новых месторождениях по 5'000 млн тонн извлекаемых ежегодно? Двадцать пять миллиардов тонн за пять лет – это всего-то по два Самотлора за год! Программа Chapter 16\Model_07_OIL_Black_Swan.py

244 Если верить данным ЦДУ ТЭК, с 2015 по 2017 наблюдалась «полочка» на уровне 3950 млн т. Разница 20 млн т железобетонно находится в пределах статистической погрешности ±3% (или ±130 млн т).

245 Талеб Н. «Чёрный лебедь. Под знаком непредсказуемости», «КоЛибри», 2016, ISBN 9785389098947. Читайте критически!

Кто к месту вспомнил известный анекдот про героев Гражданской и сказал «а ничего не будет» – угадали! Обвал получается более плавным, только и всего. Не спасут чёрные лебеди цивилизацию, хоть тресни. Хотя, конечно, некоторые биржевики на событии заработают неплохие бабки, этого не отнимешь.

Прилёт "Чёрного лебедя" в модели "Нефтяной шок" (П.Пукайт)



Подчеркнём ещё раз: входными данными модели Пукайта являются: во-первых, кривая открытий и, во-вторых, подгоночный коэффициент $s(t)$, основанный на данных реальной добычи и потребления нефти. Добычу и потребление мы знаем с точностью примерно $\pm 5\%$, а следовательно мы неплохо знаем и подгонку. Открытия, к сожалению, нам известны очень плохо – для большинства государственных нефтяных компаний это секрет, а опубликованные числа запасов имеют скорее политическую окраску. Надеяться, что одни компании будут по политическим соображениям завышать, а другие – занижать оценки извлекаемых, а при суммировании магически получится «примерно правильное число» – довольно наивно. Многие независимые исследователи²⁴⁶ полагают, что в среднем отчёты национальных компаний систематически завышены.

Несмотря на развитую математику, модель Пукайта не обладает предсказательной силой относительно времени наступления пика добычи. Автор признаёт это вполне открыто:

До определённого предела, я признаю скептический аргумент: пока пик фактически не пройден, причём с запасом, чтобы не влияли погрешности данных, мы не можем определить положение пика (математики сказали бы: «точку реализации пика») со 100% вероятностью [стр 278].

Однако положительной стороной модели является математическая

²⁴⁶ Те же геологи Ж.Лагеррер и К.Кэмпбелл, чьи оценки подробно разбирались в главе 14, или финансист М.Симмонс, чьё мнение было проиллюстрировано в главе 9.

демонстрация наступления пика вне зависимости от будущих открытий. Даже если вот-прямо-завтра откроется несколько новых Самотлоров, на график спада это почти никак не повлияет. Более того, модель демонстрирует, что даже если бесконечно добавлять к запасам всё меньшие и меньшие залежи нефти (например – числа условные – сегодня мы не считаем «месторождением» залежи «менее 100 тыс т извлекаемых», через 10 лет – «менее 25 тыс т извлекаемых», через 20 лет – «менее 10 тыс тонн», и так далее), запасы-то могут расти «почти бесконечно», а вот пик добычи всё одно будет пройден.

Ещё одно полезное свойство модели Пукайта – причинность. Экономисты-аналитики типа Майкла Линча²⁴⁷ постоянно указывают, что хаббертиана «не причинна». Объяснение примерно такое: «если верить хаббертиане, то даже тысячи лет назад годовая добыча нефти на планете Земля не была равна нулю, но мы-то знаем, что реальная добыча имеет вполне конкретное начало». Действительно, возражает математик, из формулы {8.6} следует:

$$q = \frac{4 \cdot q_0 \cdot e^{-\sigma Y}}{(1 + e^{-\sigma Y})^2}$$

$$(e^{-\sigma Y})^2 + (2 - 4 \frac{q_0}{q}) e^{-\sigma Y} + 1 = 0$$

$$e^{-\sigma Y} = 2 \frac{q_0}{q} - 1 \pm 2 \sqrt{\frac{q_0}{q}} \sqrt{\frac{q_0}{q} + 1} \approx 4 \frac{q_0}{q}, q_0 \gg q$$

$$Y \approx -\frac{1}{\sigma} \ln \left(4 \frac{q_0}{q} \right) \approx -34 \ln \left(\frac{1.5 \cdot 10^{13} \text{ kg}}{q} \right)$$

Если следовать классической формуле Хабберта, то первая тонна нефти (q=1000) на планете Земля была добыта около 800 лет назад; первый килограмм нефти (q=1) – около 1'000 лет назад, а первая молекула декана C₁₀H₂₂ (q=2.37·10⁻²⁵ кг) – около 3'000 лет назад. У европейца или китайца подобные значения отторжения не вызывают: греки твёрдо знают, из чего делался «греческий огонь», румыны и австрийцы помнят историю своей родины, россияне цитируют петровские «Ведомости» №1 от 2 января 1703 года:

Из Казани пишут, на реке Соку²⁴⁸ нашли много нефти, и медной руды, из той руды медь выплавляли изрядно, от чего чают немалую быть прибыль Московскому Государству.

Но американцы отчего-то непременно хотят, чтобы в любой модели в 1858 году добыча нефти планеты Земля была точный ноль (все же знают, что до «полковника» Дрейка нефть вообще не добывали), и у них дурацкие аргументы

247 <https://peakoil.com/production/michael-lynch-what-ever-happened-to-peak-oil>

248 Современное название – река Сок. Нефть в тех местах добывают и в XXI веке.

М.Линча неизменно находят поддержку. Издержки системы образования. Нам остаётся только пожалть плечами и указать на модель Пукайта. В ней можно сделать точный ноль в любом году, но что это меняет с точки зрения пика и запасов?

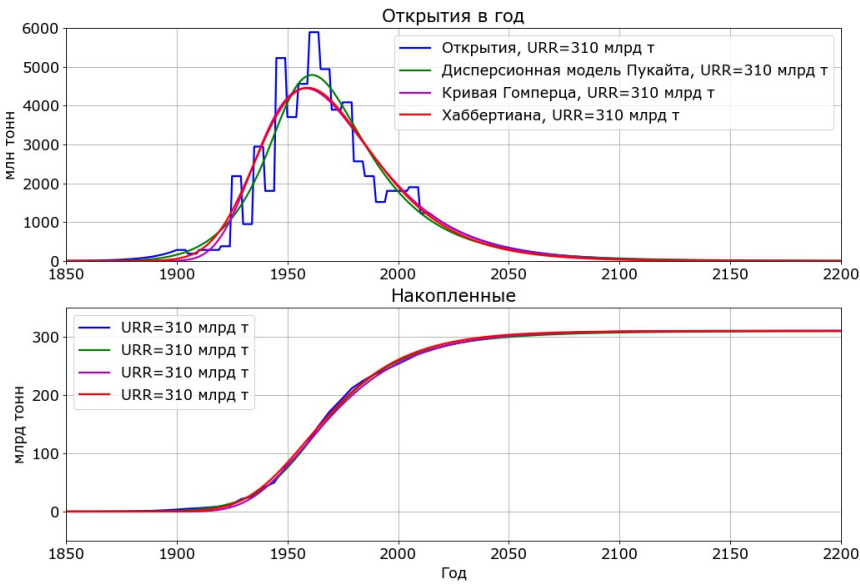
Сам Пукайт не удержался от едкого комментария:

Я не в курсе, финансируют ли нефтяные компании деятельность Линча, Ергина и им подобных, но тактика нефтекомпаний проста, как два цента:

1. Не давать никакой достоверной информации по запасам или применяемым расчётным методикам и
2. Нанимать консультантов и пропагандонов, чтобы мутить воду [стр 309-310].

Линч также любит покриковать «необоснованную симметрию» пика Хабберта: в простейшей модели пик наступает точно при добыче половины ресурса. Единственное возражение: Майкл Линч не умеет (или намеренно делает вид, будто не умеет) в ОДУ. Помимо симметричной хаббертианы есть и «степенная хаббертиана», как показано формулой {8.5} и программой **Chapter 16\Model_08_Dispersion.py**, и та же функция Гомперца, и функция Капицы {5.6}, и множество других красивых аналитических решений, удовлетворяющих условию Хабберта. Под каждое из этих решений можно при желании подвести теоретический базис.

Описание открытий кривой Хабберта и дисперсионной кривой Пукайта



Как модель Пукайта, так и степенную хаббертиану, и множество других решений можно сделать несимметричными, а описание реальной кривой открытий во всех случаях вполне удовлетворительное.

К сожалению, модель Пукайта основана на данных об открытиях

месторождений, что не позволяют применить её к природному газу и углю. В первом случае, открытия и потери (например, факельное сжигание попутного газа) ещё менее документированы, чем у нефти. В случае угля, официальные оценки извлекаемых запасов были в основном установлены ещё до Второй мировой войны и с тех пор подвергались непрерывной ревизии в сторону уменьшения (мы подробно разбирали уголь в главе 13).

Модели, где энергия тратится не одновременно с её получением, а кривые роста и спада не симметричны, математики рассматривали давно. Для разминки – классическая задача про зайцев и лис, предложенная в середине 1920-х годов американским математиком и физ-химиком А.Дж.Лоткой и независимо от него – итальянским физиком В.Вольтеррой. Десятилетием позже этой же системой уравнений занимался в Советском Союзе А.Н.Колмогоров. Пусть P_h – количество зайцев в лесу, а P_f – количество лис. Естественно описать коэффициент рождаемости лис пропорционально наличию в лесу зайцев, а коэффициент смертности зайцев – пропорционально наличию лис.

$$\frac{\partial P_h}{\partial t} = [b_h - \alpha_h P_f(t)] P_h(t) \quad P_h(0) = P_{h0}$$

$$\frac{\partial P_f}{\partial t} = [\beta_f P_h(t) - a_f] P_f(t) \quad P_f(0) = P_{f0}$$

Здесь:

α_h – нормированный коэффициент смертности зайцев, то есть вероятность неудачной (для зайца) встречи с лисой;

β_f – нормированный коэффициент рождаемости лис, то есть вероятность удачной (для лисы) встречи с зайцем.

Заметим, что оба уравнения есть не что иное, как слегка модифицированное уравнение Мальтуса-Ферхюльста {3.1}.

У системы есть тривиальное решение при $P_h = P_f = 0$; если в лесу нет ни зайцев, ни лис. Есть одно нестабильное решение при $P_f = 0$, $P_h > 0$. Если в лесу совсем нет лис, популяция зайцев уходит в бесконечность по экспоненте. Есть и стабильное решение $P_{h1} > 0$, $P_{f1} > 0$, когда популяция животных не изменяется. Если численность не меняется, производные равны нулю. Отсюда:

$$b_h P_{h1} - \alpha_h P_{f1} P_{h1} = 0 \quad \alpha_h = \frac{b_h}{P_{f1}}$$

$$\beta_f P_{h1} P_{f1} - a_f P_{f1} = 0 \quad \beta_f = \frac{a_f}{P_{h1}}$$

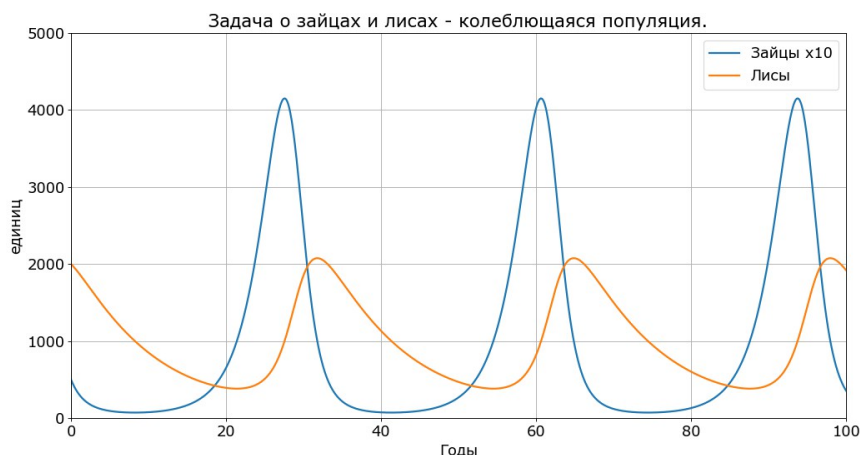
Тогда уравнения запишутся так:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_h}{\partial t} &= \left[1 - \frac{P_f(t)}{P_{fl}} \right] b_h P_h(t) & P_h(0) &= P_{h0} \\ \frac{\partial P_f}{\partial t} &= \left[\frac{P_h(t)}{P_{hl}} - 1 \right] a_f P_f(t) & P_f(0) &= P_{f0}\end{aligned}\quad \{16.6\}$$

При малых отклонениях численности от (P_{h1}, P_{f1}) , популяция будет бесконечно колебаться по синусоиде, и для таких отклонений существует аналитическое решение, аналогичное уравнению Галилея для «длинного» маятника. Нам это решение не очень интересно, поэтому приводить его здесь не будем. Желаящие могут заглянуть в любую книгу по уравнениям математической физики.

Займёмся, по следам Колмогорова, большими отклонениями, когда колебания уже не синусоида; код нам ещё понадобится. Пусть средняя продолжительность жизни лисы – 10 лет (все числа условные), тогда $a_f = 0.1$; пусть популяция зайцев при отсутствии хищников, удваивается примерно каждые два года, то есть $b_h = 0.5$. Чтобы числа были реальны, примем, что в лесу могли бы равновесно сосуществовать 1000 лис и 10000 зайцев, а в начальный момент времени имеется 5000 зайцев и 2000 лис²⁴⁹.

Считать будем программой **Chapter 16\Model_09_Rabbits_and_Foxes.py**

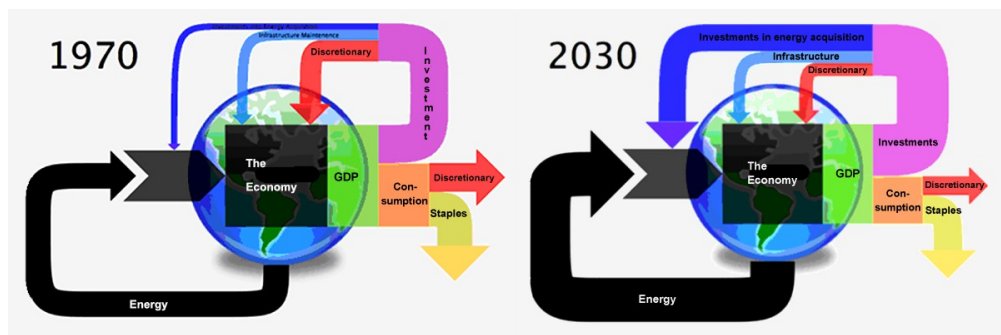


В такой постановке система будет колебаться вечно – вся энергия возобновляемая, травы в лесу столько, сколько зайцы съесть не могут. На кривой численности зайцев – относительно медленный подъём и относительно быстрый спад. На кривой лис – наоборот: относительно быстрый рост и медленный спад. Количество зайцев в лесу то сваливается почти в ноль, то

²⁴⁹ Как и в случае с популяцией карпов из третьей и четвёртой главы, положим, что численности «статистические», то есть очень большие; разрешено иметь «дробных» лис и зайцев. Если вас не устраивает «дробный заяц», считайте, что лес велик, а популяции измеряются не в тысячах, а в миллиардах особей.

взлетает до сорока с хвостиком тысяч. График численности лис отстаёт от заячьего примерно на треть периода.

Теперь от зайцев перейдём к нефти и остальным энергетическим ископаемым. Упомянутые в главе 15 Чарльз Халл и Кент Клитгаард²⁵⁰ пробуют объяснить проблему пика энергетических ресурсов качественной моделью:



Чёрная стрелка обозначает поток энергии²⁵¹. Экономика преобразует энергию в валовый продукт (зелёное GDP). Продукт этот расходуется на потребление (оранжевое) и на реинвестирование в экономику (малиновое). Потребление бывает двух типов: жизненно-необходимое (жёлтое – staples) и роскошь (красное – discretionary). Инвестиции делятся на три части: затраты на добычу энергии (тёмно-синяя стрелка), затраты на амортизацию (светло-синяя стрелка) и затраты на расширение производства (красная стрелка).

Нарисовано состояние дел в условном 1970 и условном 2030 годах. В 1970 показатель $EROEI_{ext}$ большой, затраты на добычу энергии – маленькие; соответственно больше энергии остаётся на расширение производства, а также на необязательную для жизни роскошь. В условном 2030 на добычу энергии и на амортизацию расходуется больше, соответственно на расширение производства и роскошество остаётся меньше.

Художник немного схитрил, уменьшив жёлтую стрелочку жизненно-необходимых затрат для рисунка 2030 года. Население планеты в 1970 году было 3.7 млрд, а в 2030 демографы ООН обещают нам от 8.1 до 9.0 млрд, то есть жёлтая стрелочка должна быть как минимум в 2.5 раза толще, чем в 1970 году. Если мы говорим о жизненном минимуме, то экономить не на чем! Нетрудно заметить, что делая жёлтую стрелочку толще, мы полностью убиваем красные стрелочки: и роскошество, и расширение производства. Подозреваю, что дело даже хуже: немножко от красной стрелочки затрат на роскошь останется (надо же кому-то плавать яхты и ездить «Бентли»?), а светло-синяя стрелочка затрат на амортизацию уйдёт в ноль. Вследствие естественной амортизации через какое-то время экономика схлопнется.

²⁵⁰ Charles A. S. Hall, Kent Klitgaard, *Peak Oil, EROI, Investments, and Our Financial Future*, Energy and the Wealth of Nations, SpringerLink, 03 March 2018.

²⁵¹ Я не знаю, зачем художнику понадобилось загигать энергию в колечко – в тексте ясно написано, что энергия забирается из Земли и Солнца и рассеивается в процессе производства и потребления.

Клитгаард выразился так²⁵²:

Всякий, кто говорит, будто экономика может [бесконечно] расти по экспоненте на планете конечных размеров, – либо безумец, либо экономист.

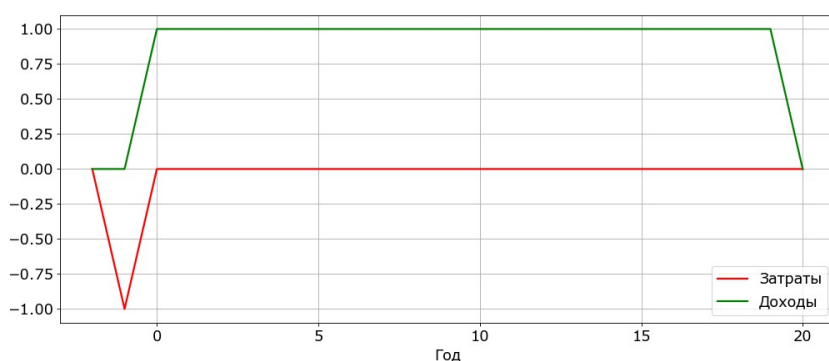
Разобрав модель Халла и Клитгаарда качественно, попробуем воспроизвести её количественно. Сами авторы код, к сожалению, не публикуют²⁵³.

В качестве калибровки возьмём следующие данные:

- Оценку суммарных извлекаемых запасов угля, нефти (жидкостей) и природного газа из главы 14 – от 1'000 до 3'300 млрд toe (наиболее вероятное значение 1'400 млрд toe).
- График добычи тех же энергетических полезных ископаемых из главы 13; накопленная добыча с 1830 по 2017 годы – 501 ± 50 млрд toe.
- Данные ООН по населению Земли и демографические прогнозы из того же источника (глава 3).
- Оценку потребления энергетических полезных ископаемых из главы 15 и оценку $ERoEI_{ext}$ по формуле {15.10}

Первая модель будет простая, не сложнее чем модель с зайцами и лисами.

Для простоты предположим, что деньги в системе жёстко привязаны к стоимости ресурсов: например, вместо доллара – килограмм нефти. Подобное выражение позволяет абстрагироваться от инфляции, действий государственных эмитентов и т. п. Под «капиталом» здесь и далее подразумеваются не деньги, а овеществлённая энергия – инструменты, заводы, транспорт, нефтяные скважины, АЭС, ветряки и так далее. Пусть затраты и получение прибыли от времени распределены по времени как показано ниже:



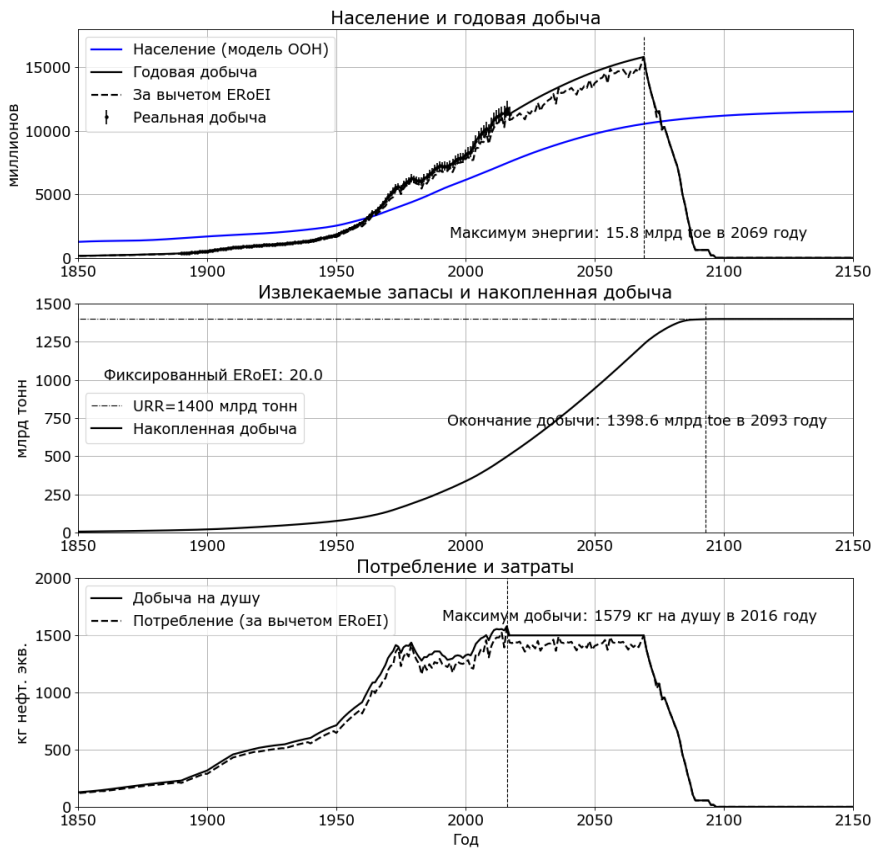
Например, в минус первом году вы потратили 1 toe угля, чтобы найти залежь. Затем из этой залежи вы добываете 20 полных лет (с нулевого по 19 год включительно). В 20-м году месторождение заканчивается, но вы заранее

²⁵² <https://www.wells.edu/faculty-staff/kent-klitgaard>

²⁵³ Во всяком случае, поиск в Интернете обнаружил лишь программы по природопользованию Коста-Рики.

идёте искать новое: $ERoEI_{ext}=20:1$. Шахтёры в нашей простейшей модели во время добычи ничего не потребляют (кроме еды), а все добытые ресурсы тратятся на развитие других средств производства (за пределами энергетики). Если вас не пугает такая аналогия, думайте о первой модели как о рабовладельческом строе в тропиках, где даже самый главный инженер ходит в травяной набедренной повязке. Кнуты надсмотрщиков и цепи рабов считаются «капиталом». Вычислим программой **Chapter 16\Model_10_Basic_Energy.py**

Простейшая модель энергетики



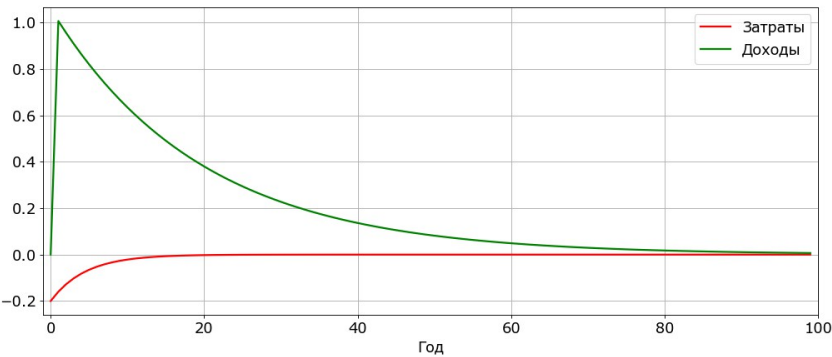
Тут самое время вспомнить, что некоторые траты в модели Халла-Клитгаарда имеют эпитет «discretionary», сиречь «по собственной воле»: общество в целом (или какая-то значимая часть общества), на основании каких-то своих социальных законов решает, сколько тратить на потребление, а сколько – инвестировать в производство. Законы меняются от времени. Ясно, что фактическая кривая добычи угля, нефти (точнее «жидкостей») и природного газа с 1890 по 2017 годы есть следствие инвестиционной политики. Постигать ход мысли нефтеброкеров и председателей советов директоров тут ни к чему, надо просто принять мир как он есть по факту и инвестировать в нашу модельную энергетику ровно столько, сколько нужно, чтобы идеально описать

добычу в реальном мире. Точно так же в модели П.Пукайта выбиралась функция $s(t)$.

После 2017 года мы условно полагаем, что экономика стремится сохранить абсолютную добычу на душу населения: около 1.5 тонн нефтяного эквивалента в год. Допущение вполне нормальное, а точная подгонка нам не нужна – модель ещё «сырая». Не стоит придавать особого значения и годам – они пока условные. Максимум добычи ископаемых энергоресурсов – 2069 год (15.8 млрд тое/год), максимум добычи на душу населения – 2016 (1'579 кг/год). Повторим: не надо придавать... однако задумаемся. С 2016 по 2069 год в модели происходит странная ситуация. Валовой продукт вроде бы растёт: вокруг всё больше «сланцевых» нефтескважин в Северной Дакоте, газопроводов «Северный поток» на Балтике и карьерных экскаваторов в Альберте. При этом среднее, на душу населения, ~~вещественное~~ потребление (не услуги ~~проектного~~ дипломированного гомеопата, а джинсы, мобильные телефоны и «Форд-Фокусы») – не меняется. В реальном обществе нефтепроводы и экскаваторы принадлежат не владельцам «Фокусов», а элите. Значит, «бедные остаются бедными, средний класс остаётся средним классом, а богатые богатеют».

Так идёт до 2069 года, а дальше... обвал! Инвестиции почти полностью прекращаются, и за 10-15 лет добыча ископаемого топлива уходит в полный ноль.

Однако показанные на картинке выше затраты и доходы могут существовать только в воображаемом мире. От применения резко падающих функций кривая потребления получается нестабильной, так как инвестиции год от года резко меняются. В реальности надо применять плавно убывающие вероятностные функции {16.3} как в модели Пукайта. Пусть, для начала, функции будут простыми экспонентами:



Здесь мы полагаем, что часть капитала ежегодно амортизируется:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = (1 - d) C \qquad C(0) = C_0$$

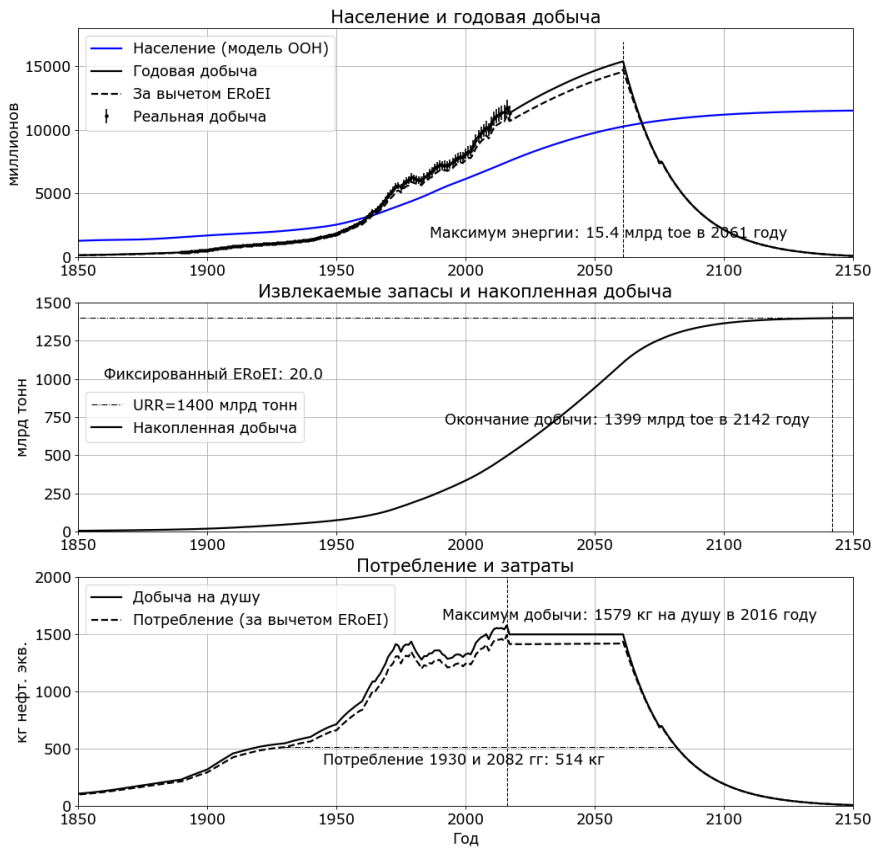
Если константу d положить равной нулю (амортизации нет, капитал работает

вечно), то ERoEI получится бесконечным. Мы полагаем, что капитал изнашивается за характерное время 20 лет, то есть **d=0.05**. Скажем, в 1800 году вы инвестировали в экономику тонну нефти. Этот капитал будет работать много десятилетий (как на месторождении Весёлое). Через сто лет от тонны ваших инвестиций останется, в среднем, $0.95^{100}=0.006$ – шесть килограммов нефтяного эквивалента²⁵⁴. За сто лет тонна капитала произвела бы:

$$ERoEI_{ext} = \rho_0 \cdot \int_{1800}^{1900} (1-d)^{t-1800} dt = \frac{\rho_0}{\ln(0.95)} [0.95^{100} - 0.95^0] = 19.4 \rho_0 : 1$$

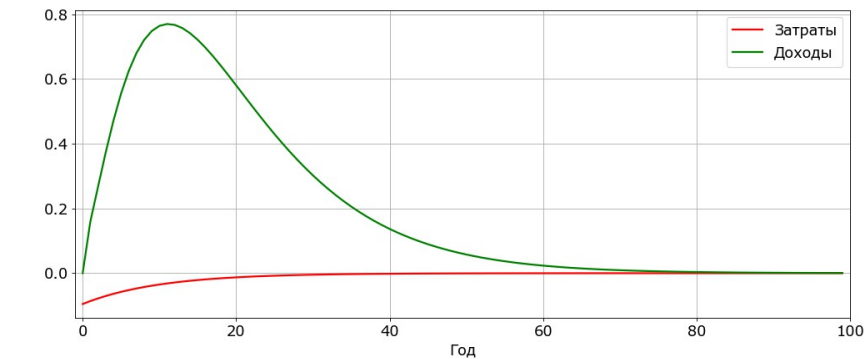
Выбирая $\rho_0 = 1.031$, получаем ERoEI = 20:1. Считаем программой **Chapter 16\Model 11 Basic Energy2.py**

Простейшая модель энергетики

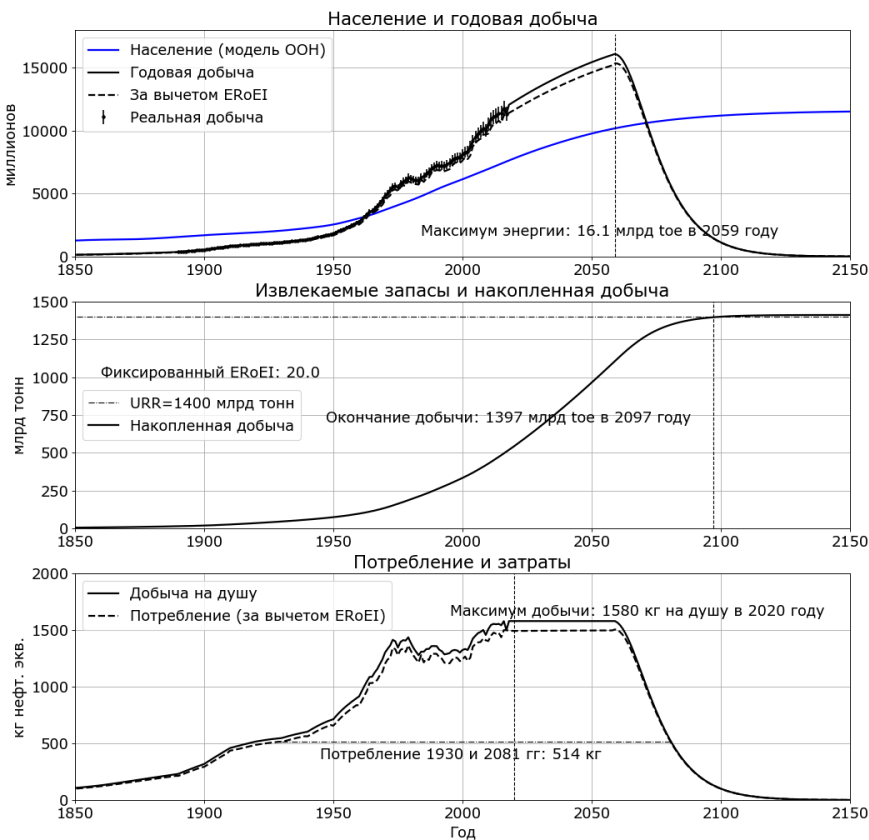


254 Например, вы сдали насос-качалки в металлолом. Это всё равно выгодней, чем добывать новую руду. Считайте, что вы получили назад разницу в затратах энергии при производстве стали из качественного лома и из руды (в последнем случае вместе с добычей и обогащением). Не следует путать физическую амортизацию капитала с тем, как используют термин бухгалтеры. У бухгалтеров так: если вы купили станок за \$1 млн, то стоимость станка будет поделена на сколько-то лет, скажем 20. Потом в течение 20 лет вы имеете право добавлять по \$50'000 к годовым издержкам и уменьшать таким образом налог на прибыль.

Заметим, что теперь функция потребления стала гладкой. Если вас смущает острый пик на вершине «акульего плавника», можно заменить простые экспоненты на цепочки Маркова как показано программой **Chapter 16\Model_12_Basic_Energy3.py**

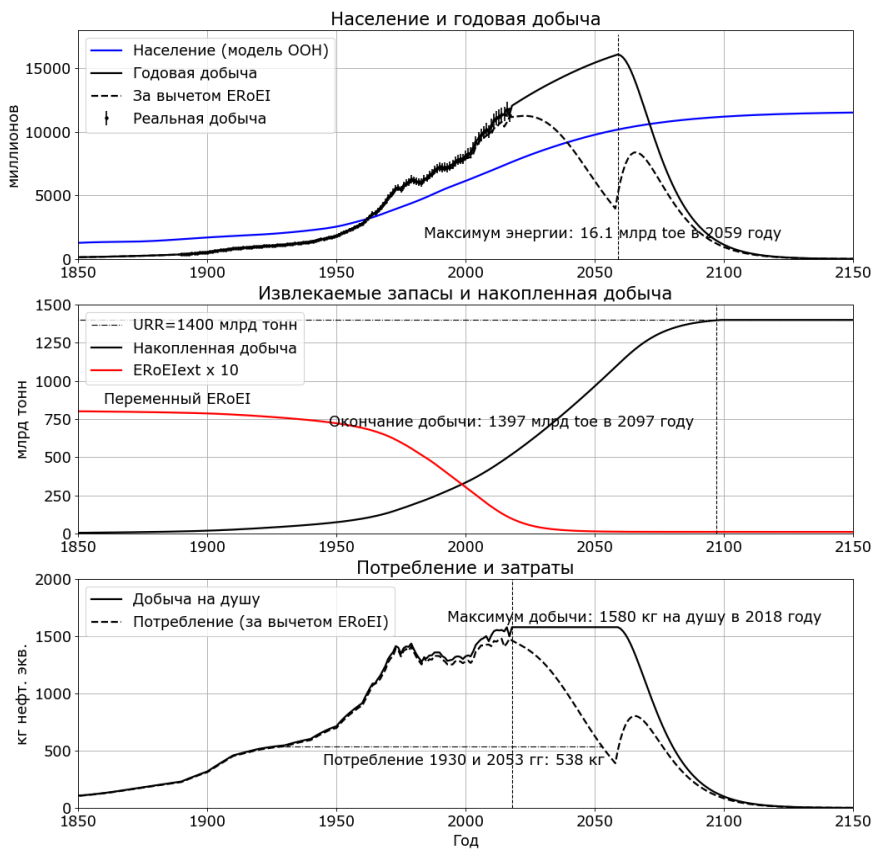


Простейшая модель энергетики (цепочки Маркова)



Как обсуждалось в главе 15, $ERoEI_{ext}$ по мере истощения месторождений будет уменьшаться. Для следующей модели используются фильтры затрат и доходов как выше, а $ERoEI_{ext}$ рассчитывается по формуле {15.10}. Используем программу **Chapter 16\Model_13_Basic_Energy4.py**

Модель энергетики с переменным $ERoEI_{ext}$



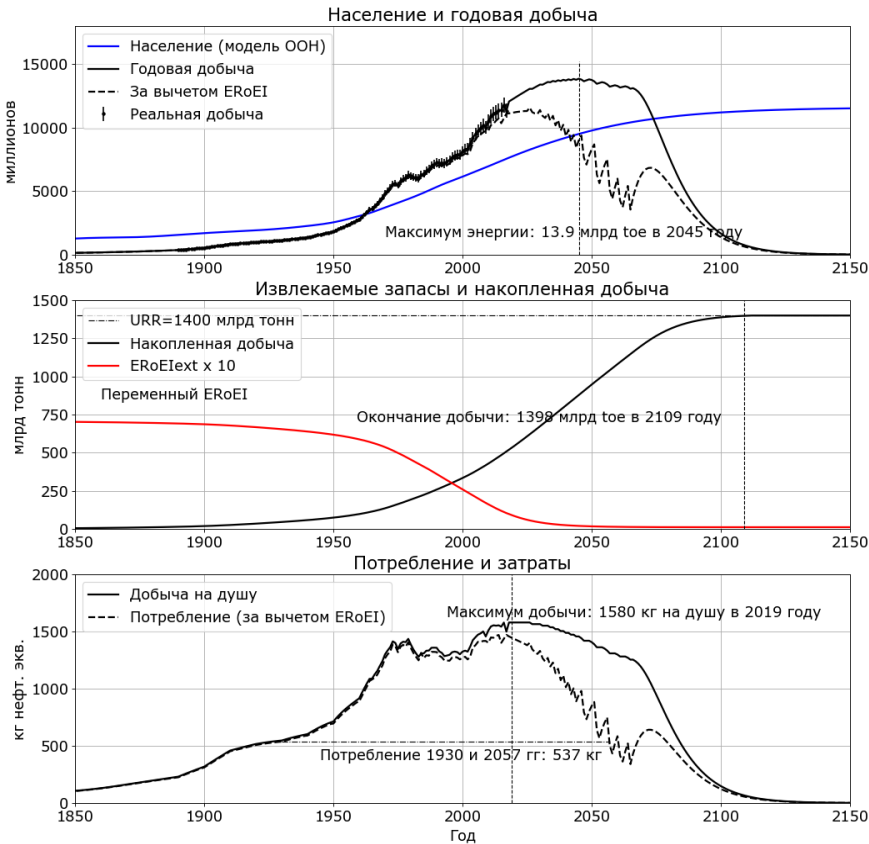
В уточнённой модели максимум добычи по тройке «уголь-нефть-газ» наступает в 2059 году на уровне 16 млрд toe. Пик потребления – в 2014 году, 1'480 кг.

Нас не интересует абсолютная величина килограммов на душу в год. Споры о том, сколько нефти тратится на производство «Айфона» модели 2016 года и насколько «Айфон» полезнее в хозяйстве, чем чёрно-белый телевизор «Изумруд» образца 1979 – по меньшей мере наивны. Что интересно: с какой скоростью будет снижаться потребление во второй четвертушке XXI века? При сокращении доступной энергии на душу населения технический прогресс может и вспять пойти. Например, в вашем городе есть и энергосберегающие лампочки, и «Айфоны», и даже «Теслы», но 20 часов в день в сети нет электричества. Не всё ли вам равно, какая у кого версия «Айфона»? В построенной нами модели, «Новый, 1930 год» с уровнем потребления 540 кг

эквивалента на душу наступает в 2053 году. С 2014 по 2053 происходит довольно чувствительный спад материального уровня жизни по 2.5% в год. Всё это время продолжается увеличение добычи ископаемого топлива (в основном газа и угля; нефть уже прошла пик) и наращивание энергетической инфраструктуры: «бедные беднеют, а богатые богатеют».

Всплеск потребления между 2059 и 2079 годом связан с прекращением инвестирования в *новые* проекты «классической» угольно-газовой отрасли; при этом освобождается довольно много средств. Правдоподобной такая модель не выглядит – вряд ли все компании планеты разом договорятся прекратить инвестирование. Наша модель пока не включает минимальный уровень потребления («staples» на диаграмме). Где конкретно этот уровень лежит, сказать сложно – авторы приводят лишь грубые оценки. Вероятно, он изменяется в зависимости от страны, привычек населения и климата. В странах, где исторически был высокий уровень потребления, социальный взрыв может наступить раньше, чем там, где уровень потребления был низок. Один из возможных сценариев, когда мировая экономика проходит через серию кризисов – в программе **Chapter 16\Model_14_Basic_Energy5.py**

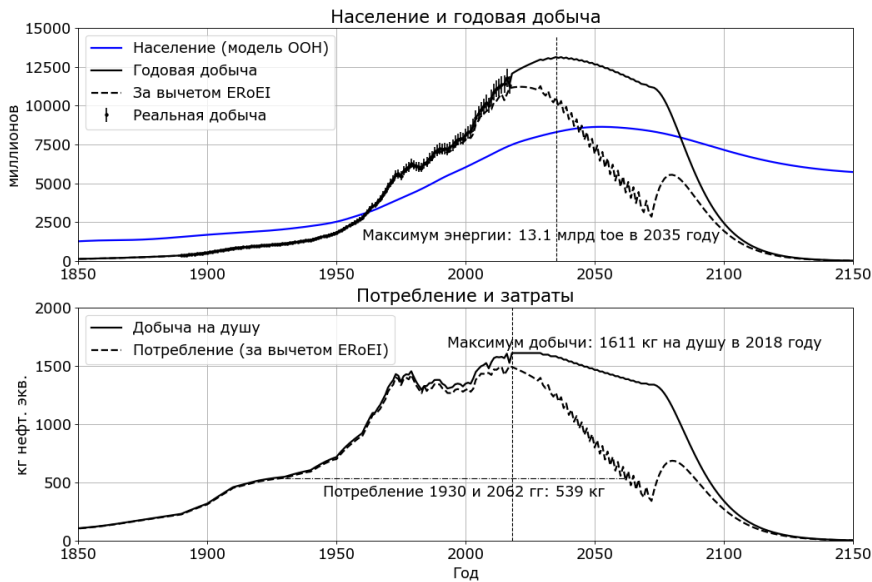
Модель энергетики "Колеблющееся плато"



Этот вариант развития событий «любят» примерно с 2005 года в IEA, называя его «сценарием колеблющегося плато» («Undulating Plateau») ²⁵⁵. Если закрыть листочком всю нижнюю часть графика и не думать, что *на душу населения* снижается как абсолютная, так и скорректированная за ERoEI добыча, то всё выглядит вполне красиво и мирно: добыча по тройке «уголь-нефть-газ» с 2025 по 2075 годы колеблется на «полочке» около 13.5 млрд тое в год. Но если вспомнить про душевое вещественное потребление, можно было бы сказать, что «бедные беднеют, а богатые *не богатеют*». Представляется, что всё будет несколько сложнее, и ситуацию придётся описывать так: «бедные беднеют, некоторые богатые становятся бедными, остальные богатые – богатеют». Скорее всего, «социальные лифты» продолжают работу, поднимая наверх сотни счастливчиков. «Социальные мусоропроводы», правда, будут трудиться куда активнее, сбрасывая как обитателей элитных пентхаузов (тысячами), так и жильцов из трёшек «среднего класса» (десятками миллионов) в помойный контейнер нищеты.

Имея в руках модель, самое время с нею немного поиграть! Что может пойти «так» и что может пойти «не так»? Сначала – позитив. Демографы ООН заверяют нас, что с вероятностью примерно 15% рост населения планеты остановится в 2050 году. «Новый, 1930 год» будет при этом отсрочен на 10 лет. Программа **Chapter 16\Model_16_Basic_Energy_Low_Population.py**

Базовая модель энергетики, нижняя оценка населения

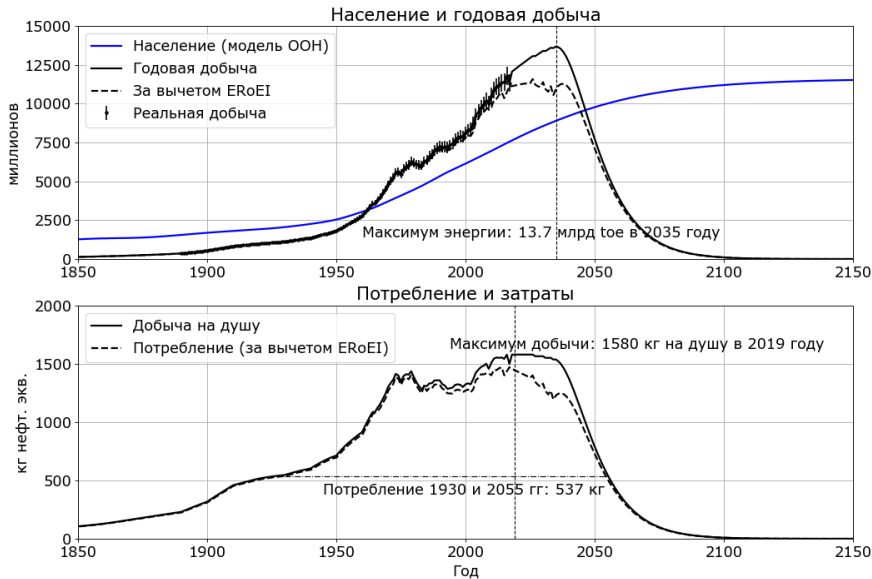


В общем, разница по населению планеты в 2060 году – как видит её ООН – не так уж велика: между 8.6 и 12.1 млрд, наиболее вероятное 10.2, разброс $\pm 14\%$.

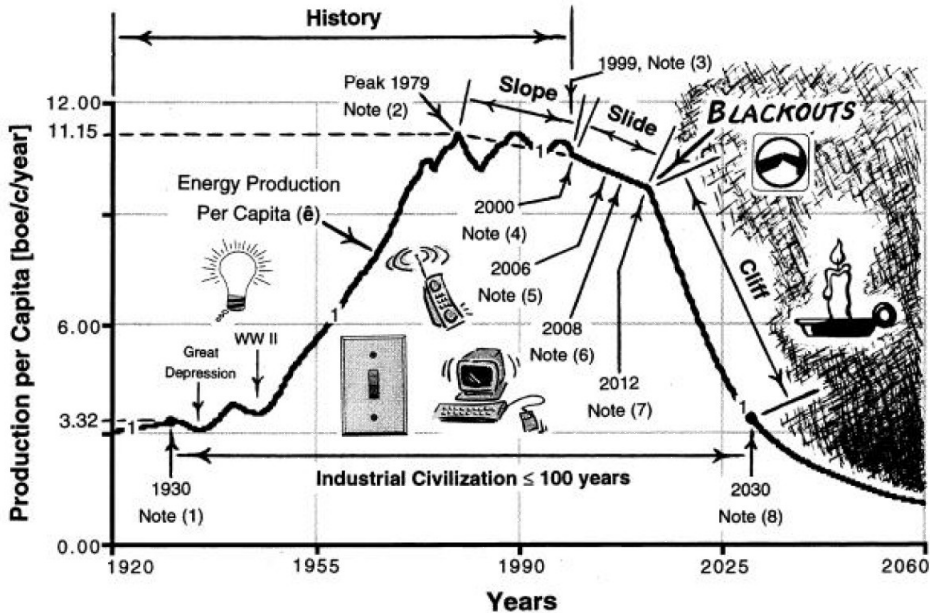
255 Ещё один способ сделать модель с «колеблющимся плато» – уменьшать душевое потребление на 0.5-1% в год. Это эквивалентно ежегодному «микрорезису», а уровень потребления 1930 года достигается в 2060. В Цифровом приложении есть программа **Chapter 16\Model_15_Basic_Energy6.py**

Существенной роли это не сыграет. Теперь новости похуже. С вероятностью около 10% у нас может случиться $URR=1'000$ млрд тое. Что получится, показывает программа **Chapter 16Model 17_Basic_Energy_Low_URR.py**

Базовая модель энергетики, нижняя оценка населения



В 2055 году наступает не «Вторая великая депрессия»™, а просто обвал в XIX век и далее. Тут к месту вспомнить ~~патологоанатома~~ социолога Ричарда Данкина²⁵⁶, запустившего в оборот «Олдувайскую теорию»:



256 Richard C. Duncan, **World Energy Production, Population Growth, And the Road to the Olduvai Gorge**, Population and Environment, May-June 2001, v. 22, № 5 стр. 503-522

По вертикали тут отложены баррели условной нефти на душу населения: 11.15 барреля – это примерно 1'510 кг. Можно с уверенностью утверждать, что основное положение гипотезы Данкина²⁵⁷ вряд ли сбудется:

The Olduvai theory is a data-based schema that states that the life expectancy of Industrial Civilization is less than or equal to 100 years.

Олдувайская теория основана на данных и говорит, что время жизни Индустриальной Цивилизации меньше либо равно 100 годам.

Время жизни индустриальной цивилизации как минимум (в самых пессимистичных предположениях) на тридцать лет дольше. Однако, если заменить «сто лет» на «двести», то полной уверенности в опровержении Олдувайской гипотезы у нас нет.

Для полноты картины следует добавить в модель ВИЭ и ядерную энергию, как мы делали в прошлой главе; этим мы займёмся в следующей статье.

Подведём итоги главы:

- При моделировании добычи следует учитывать не только значение ERoEI, но и характерное время задержки инвестиций. Любое месторождение с момента открытия проходит ряд стадий: принятие решения, подготовка освоения и т.д.
- Рассмотрена модель «Нефтяной шок» из книги Пола Пукайта «Таинственная бочка нефти» (2011-2014). Пукайт использовал для моделирования спада нефтедобычи фильтры («цепочки») Маркова. Нами воспроизведён работающий код на Python, проведены численные эксперименты с использованием «оценки Лагеррера» 2014 года и реальными данными добычи по 2017 год.
- Вслед за П.Пукайтом продемонстрировано, что пик добычи мало зависит от маловероятных открытий в будущем крупных месторождений («чёрных лебедей» в терминологии Н.Талеба), а также перевода в категорию подтверждённых запасов десятков тысяч малых, сверхмалых и карликовых залежей нефти, вне зависимости от года их открытия и формальной «привязки» карликовых к крупным месторождениям.
- Продемонстрирована классическая модель Лотки-Вольтерры с накоплением энергии в постановке Колмогорова. В этой модели использованы две функции (условные «зайцы» и условные «лисы»), и происходит перекачка энергии: сначала из окружающей среды в «зайцев», а затем из «зайцев» в «лис». Колебательное решение асимметрично для обеих функций.

257 Правильно называть Олдувайскую теорию не теорией, а гипотезой. Расчёты Данкина основаны на предсказаниях количества населения Земли по сигмоиде и добыче ресурсов по хаббертиане. Ясно, что в долговременной перспективе как минимум население по сигмоиде не развивается.

- Обсуждается качественная модель Чарльза Халла и Кента Клитгаарда о перекачке энергии из ресурсов планеты (и Солнца) сначала в капитал, а затем в потребление. Предпринята попытка численно воспроизвести эту модель. Численная модель учитывает задержку времени между инвестированием энергии и получением энергии в виде энергетического сырья.
- Численная модель показывает, что в любых обоснованных предположениях материальное потребление по тройке «уголь-нефть-газ» на душу населения возвращается к уровню 1930 года примерно к 2060. Абсолютный пик добычи энергетического сырья может при этом варьировать в широких пределах, особенно по времени наступления. Пик добычи энергетических полезных ископаемых не обязательно наступает после добыче примерно половины ресурса. Скорее, пик наступит после добычи $\frac{2}{3}$ или $\frac{3}{5}$ совокупных извлекаемых запасов угля, нефти и газа, то есть на уровне накопленной добычи порядка $1'000 \pm 200$ млрд тое; извлекаемые запасы нефти (от 280 до 400 млрд тонн) к тому времени будут выработаны на 85-90%.
- Наступление абсолютного пика добычи нефти или абсолютного пика всех энергоресурсов никак не связано с пиком потребления на душу населения. Последний пик по тройке «уголь-нефть-газ» в большой долей вероятности уже прошёл между 2009 и 2017 годами (наиболее вероятно в 2014 году) на уровне около 1'480 кг эквивалента в год. Следует ожидать снижения уровня жизни в среднем по 2.5% за год; конечно, в некоторых развитых и экономически сильных странах такое снижение будет идти медленнее, за счёт «экспорта проблем» в страны менее развитые или менее сильные.