



Глава 20. Демографический переход: прямой или обратный?

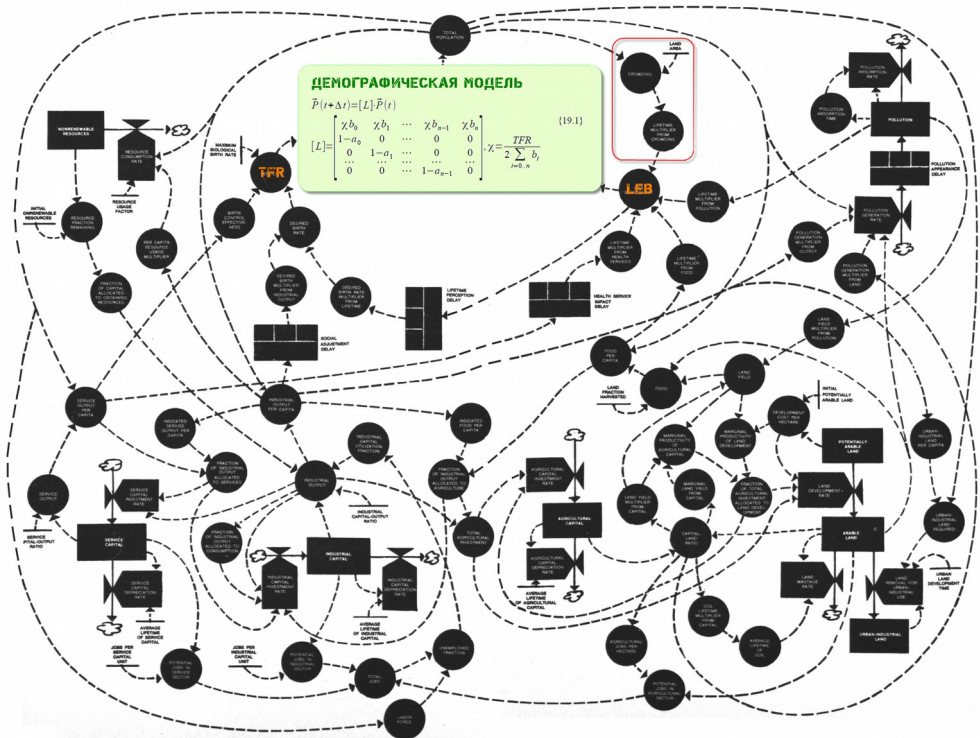
Так как наша модель представлена в форме математических уравнений, она имеет два важных преимущества по сравнению со словесными — философскими — моделями. Во-первых, каждое выдвинутое нами предположение записано в точном виде и, таким образом, открыто для сторонней проверки и критики. Во-вторых, если обсудив наши предположения и приняв их приблизительно верными, вы запускаете компьютер, последствия для мировой [экономической] системы рассчитываются автоматически и объективно — без вашего дополнительного влияния на результат[...] Притом, нет причин оставлять нашу модель в её нынешнем виде. Мы намерены изменять, расширять и улучшать её по мере накопления знаний и повышения качества информационной статистики.

— Д.Медоуз, из книги «Пределы роста» [1]

No tree grows to Heaven (Ни одно дерево не дорастает до неба).

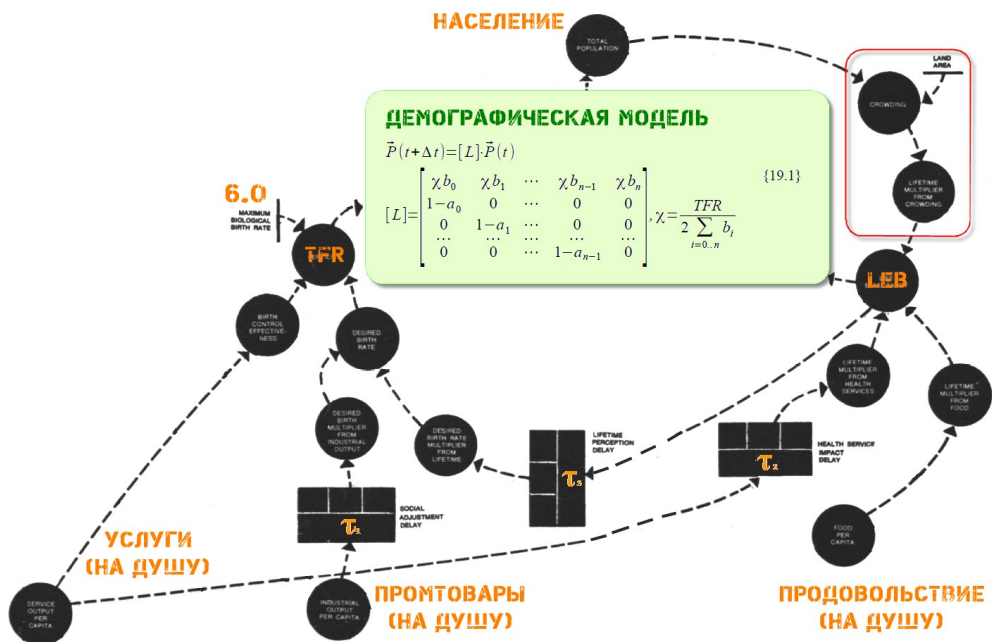
— Биржевая мудрость с Уолл-Стрит⁴¹⁴.

В прошлой главе мы заменяли написанный в системе *STELLA* код модели *World3*. Получилось примерно как ниже. Всё чёрно-белое на диаграмме — репродукция из «Пределов роста» 1972, а цветные модули — наш новый код.



⁴¹⁴ Как вариант, «Ни одно дерево не поднимет кроны в Рай, если только не прорастёт корнями в Ад». Приписывается психиатру Карлу Юнгу (1875-1961).

Огромное количество стрелочек не должно пугать – в этой и последующей главах мы разобьём модель на удобопонятные блоки. Первый блок связан, ясное дело, с населением:



Дабы в дальнейшем избежать разночтений, определимся с терминологией (речь конкретно о нашей модели, а не о математике «вообще»):

- **Константами** назовём физические величины, определяемые с достаточной точностью за пределами модели. В 1 барреле нефти – ровно 0.159 м³, и от нашего произвола это определение не зависит.
- **Параметрами** будем называть неизменные – на протяжении модельного времени – величины, которые мы выбираем самостоятельно. Например, максимальное *среднее* (отдельные мамы рожают куда больше!) количество детей у женщины $TFR_{max} = 6.0$ выбрано из общих соображений и подгонкой модели к реальным данным. О величине параметров можно спорить: что если женщина в среднем может родить не 6, а скажем, 8 отпрысков? Однако и у параметров есть физические ограничения. Было бы странным принять $TFR_{max} = 75$, так как человек (будем надеяться) не принадлежит биологическому виду *sus scrofa domestica*, а женщина – соответственно не свиноматка. Кто-то может возразить, что в XXIII веке дети будут рождаться не от женщин, а «при помощи пара и электричества»™. На это есть контр-возражение, что мы не пытаемся моделировать XXIII век; если хотите, сделайте собственную модель – и пусть там TFR_{max} станет не параметром, а переменной.

- **Переменными** называются величины, изменяющиеся в пределах модельного времени. В нашей модели, **LEB**, **TFR**, народонаселение **P** – это переменные.
- **Параметризация** – это модельная функция, отражающая эмпирическую зависимость между переменными. Каждая параметризация зависит от какого-то числа параметров, а также может включать и константы.

«Теория» демографического перехода, разработанная Томпсоном и Ноутштейном в докомпьютерную эру, была в основном словесной и выражалась длинными академическими предложениями типа: «повышение продолжительности жизни вследствие снижения детской смертности приводит родителей к мысли, что обеспеченная старость может быть и при меньшем количестве детей в семье, что вызывает социальное давление для снижения рождаемости». При этом нигде не делалось заявлений, какое конкретно увеличение продолжительности жизни вызывает какое конкретно снижение **TFR** и за какое конкретно время. Авторы «*Пределов роста*» в 1970-х пошли дальше и ввели в модель численные зависимости, пусть грубые и упрощённые.

Начнём с ожидаемой продолжительности жизни **LEB**. Согласно модели *World3* образца 1972 года, на продолжительность жизни непосредственно влияют, в порядке убывания значимости:

1. **Доступность продовольствия.** Ясно, что без пищи человек жить не может, притом смерть от голода наступает крайне быстро – за период существенно менее года.
2. **Доступность услуг.** Под «сферой услуг» понимаются не только и не столько банки, парикмахерские и почта-телефон-телеграф, столько охрана правопорядка, медицинское обслуживание, система образования, транспортная система, система социальной защиты стариков или нетрудоспособных и т. п. В отличие от доступности продовольствия, доступность услуг действует не мгновенно, а с характерной задержкой $\tau_2 > 1$ года. Например, если с 1945 года вы начали выделять МУР дополнительных Шараповых, чтобы «Вор должен сидеть в тюрьме»TM, долгожданная «*Эра милосердия*» не наступит сразу в 1946, и людей не перестанут убивать (вспоминаем сторожа магазина и его смелого внука). На отлов и посадку бандитов уйдёт какое-то время; в процессе какое-то количество бандитов и сотрудников МУР погибнет – это сокращение **LEB**.
3. **Загрязнение окружающей среды** (на упрощённой схеме не показано) может приводить к увеличению смертности. В этой временной версии нашей модели учитывать загрязнение пока не будем.
4. **Доступность промышленных товаров** вроде бы увеличивает продолжительность жизни. Например, если в вашем доме не копящая буржуйка, а центральное отопление и электрическая плита, у вас ниже

шансы заработать рак лёгких или туберкулёз. В модели 1972 года эта зависимость полагалась несущественной и в явном виде не вводилась. Мы тоже пока откажемся от моделирования.

5. Количество родов у женщины (**TFR**) может влиять на продолжительность жизни, особенно при низком качестве медицинских услуг: осложнения при родах никто не отменял. В явном виде, однако, зависимость в модели 1972 года отсутствует.
6. **Скученность** (на схеме в красной рамке) может приводить к эпидемиям и оттого – к снижению продолжительности жизни. В запусках модели 1972 года было показано, что эта переменная начинает влиять только при населении планеты свыше 20 млрд. В последующих моделях скученность не использовалась – в пределах XXI столетия такая популяция землян вряд ли достижима, – и мы скученность тоже воспроизводить не будем.

Итак, мы выделили 6 переменных в системе, которые непосредственно управляют **LEB**. Предлагаю читателям остановиться на пару минут и придумать что-то ещё. Из этих шести переменных пока будем моделировать первые две, три держим в памяти на будущее, про последнюю – забудем. В общем виде зависимость выражается формулой:

$$LEB(t) = F_1(q_{\text{продовольствия}}(t)) \times F_2(q_{\text{услуг}}(t - \tau_2)) \quad \{20.1\}$$

Здесь:

F – модельные функции (параметризации);

q_{продовольствия} – количество продовольствия на душу населения в килограммах зернового (рисового) эквивалента в год;

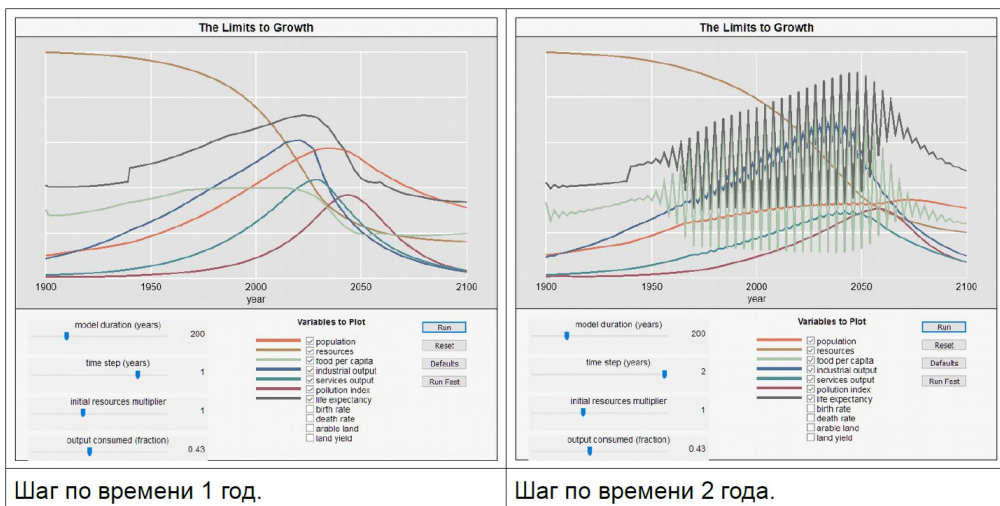
q_{услуг} – количество услуг на душу населения в условных долларах («УД») в год;

t – время в годах;

τ₂ – задержка в годах.

В варианте *STELLA / DYNAMO* 1972 года и далее на *Vensim*, задержка точно такая, как показано в формуле выше. Например, пусть **τ₂** = 10 лет. Тогда от прихода новых Шараповых в МУР 1945 года криминогенная обстановка в Москве никак не меняется вплоть до 1955, а затем мгновенно, скачком, наступает улучшение. Аналогично, если всех Шараповых без замены уволить на пенсию в 1970 году, то до 1980 обстановка будет неизменно спокойной, а в 1981 – внезапно наступит разгул преступности и ад крошечный по всему городу. Ясно, что в реальной системе таких скачков быть не может, а изменения должны накапливаться постепенно. На проблему стабильности функций задержки *World3* неоднократно указывали критики. Ниже приведены расчёты по версии на *Vensim* образца 2003 года⁴¹⁵. Вплоть до шага по времени 1 год система стабильна, а при шаге 2 года – срывается в автоколебания, причём сильнее всего «пляшет» как раз **LEB**.

415 Спасибо Брайану Хейзу: <http://bit-player.org/extras/limits/>



Вместо уравнения {20.1} в нашем коде будем употреблять среднее значение по всему периоду задержки:

$$LEB(t) = F_1(q_{\text{продовольствия}}(t)) \times F_2\left(\frac{1}{\tau_2} \int_{t-\tau_2}^t q_{\text{услуг}}(x) dx\right) \quad \{20.2\}$$

Для проверки нашей модели будем сравнивать с базовой моделью из «Пределов роста» 2003 года [3, стр. 168-169]. Автор не ставит себе задачу воспроизведения результатов «Пределов роста» с точностью до семи десятичных знаков, и уж тем более не намерен портировать *Vensim* на *Python* (последнее, вероятно, будет и нарушением авторских прав). Воспроизведение любых, не исключая и численных, экспериментов представляет ценность, если эффект наблюдается также и на установках или в программах, слегка отличающихся от тех, что использовали авторы проверяемой работы.

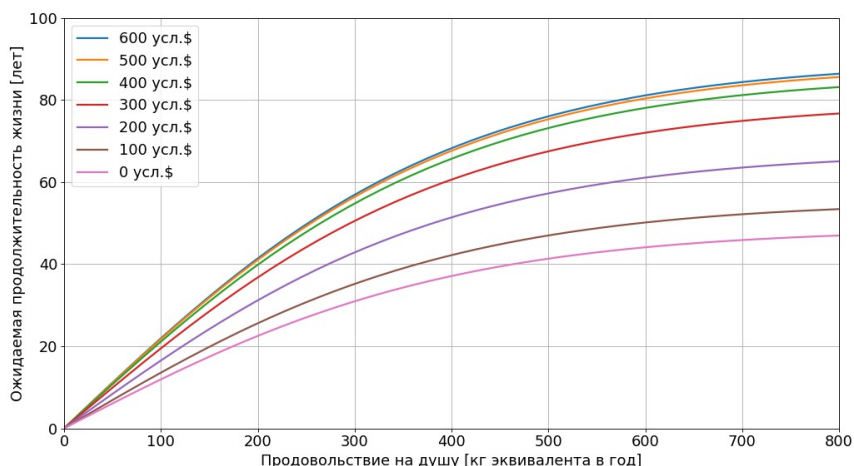
Первоначально определим {20.2} так:

$$F_1(x) = \text{Sig}(x, x_1=0, \sigma_1=0.005, -45, 45) \\ F_2(x) = \text{Sig}(x, x_2=200, \sigma_2=0.012, 1, 2) \quad \tau_2=25 \quad \{20.3\}$$

При натуральном хозяйстве и слабом государстве, в отсутствие крупной торговли и организованного транспорта, «услуги» равны нулю. Увеличение доступности продовольствия от нуля до 800 кг в год приводит к увеличению ожидаемой продолжительности жизни с нуля до примерно 45. Далее неважно, сколько продовольствия приходится на душу – выше 45 лет не будет, если только не подключатся услуги. При увеличении услуг с 0 до 600 УД продолжительность жизни увеличивается с 45 до примерно 90 лет, а далее рост прекращается. В реальной экономике, естественно, доступность продовольствия и услуг меняется независимо, а продолжительность жизни

LEB может принимать любые значения между кривыми «0» и «600».

Зависимость LEB от доступности продовольствия и услуг



Далее рассмотрим, что влияет на желаемое количество детей в семье, **DFR** (desired fertility rate). Опять-таки в порядке убывания значимости:

1. **Ожидаемая продолжительность жизни (LEB).** Во-первых, вслед за Томпсоном полагаем, что при устойчивом снижении детской смертности родители понимают, что меньшее количество детей всё-таки позволит обеспечить собственную старость. Во-вторых, как обсуждалось в предыдущей главе, полагаем, что при повышении **LEB** наступает момент, когда правительство решает, что населения в стране уже достаточно для обороны и промышленности, а более не прокормить. Заметим, что **LEB** влияет не сразу, а с интегральной задержкой $\tau_3 > 1$.
2. **Доступность промышленных товаров** – самый непонятный фактор. Можно возразить, что как раз наоборот: снижение рождаемости вызывает изобилие товаров. Для начала предположим, вслед за авторами «*Пределов роста*», что наличие товарной экономики предполагает уход от натурального хозяйства, урбанизацию и индустриализацию, а следовательно – увеличение затрат на каждого ребёнка. В этой зависимости тоже есть задержка с характерным периодом $\tau_4 > 1$.
3. **Доступность продовольствия** может влиять на принятие решение о количестве детей в семье (то есть «много еды – рожаем»). В модели 1972 года, однако, эта зависимость не моделировалась.
4. **Загрязнение окружающей среды** (на схеме не показано), вероятно, может побудить женщин меньше рожать – по крайней мере, не рожать уродов. Эта зависимость тоже не моделировалась.
5. **Скученность.** По-видимому, влияния на **DFR** либо нет, либо оно минимально.

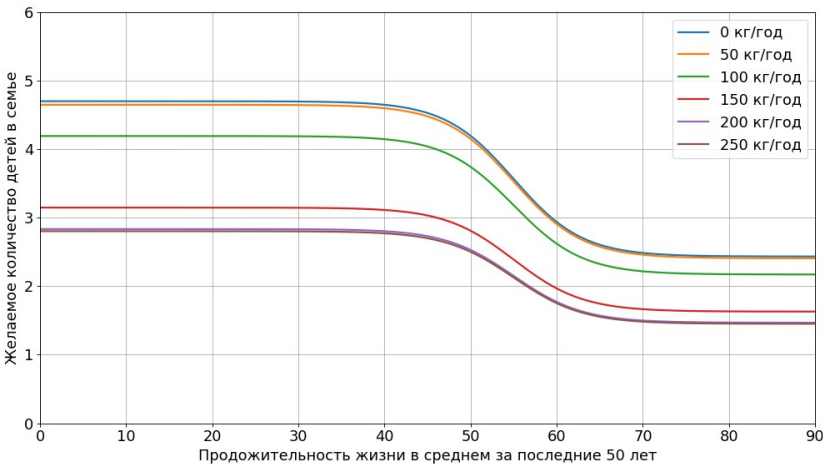
Отсюда:

$$DFR(t)=F_3\left(\frac{1}{\tau_3}\int\limits_{t-\tau_2}^tLEB(x)dx\right)\times F_4\left(\frac{1}{\tau_4}\int\limits_{t-\tau_3}^tq_{\text{промтоваров}}(x)dx\right)\quad\{20.4\}$$

В качестве начальной параметризации примем:

$$\begin{aligned} F_3(x)&=Sig\left(x,x_3=55,\sigma_3=0.250,2.8,1.45\right) & \tau_3&=50 \\ F_4(x)&=Sig\left(x,x_4=120,\sigma_4=0.050,1.68,1\right) & \tau_4&=40 \end{aligned}\quad\{20.5\}$$

Зависимость TFR от LEB и доступности потребительских товаров



При натуральном хозяйстве (среднее потребление 0 кг условных промтоваров в год), повышение **LEB** с 30 до 70 лет приводит к снижению **DFR** с 4.7 до 2.45. Далее, по мере увеличения потребления промтоваров с 0 до 250 условных кг, желаемое количество детей в семье снижается с 2.45 до 1.45.

От желаемого **DFR** до действительного **TFR** осталось применить параметризацию: планирование семьи зависит от текущего состояния услуг. Если услуг нет совсем – ни образования, ни медицины – совершенно всё равно, сколько женщина хочет. Количество детей в семье будет определяться социально-биологическим максимумом **FR_{max}** – приблизительно 6 детей в среднем на женщину. Заметим, что при недостатке медицины у кого-то может быть и 20 отпрысков (семья композитора И.С.Баха тому примером), но для кого-то первые роды внезапно оказываются и последними, причём ребёнок тоже не выживает. В качестве функции примем для начала:

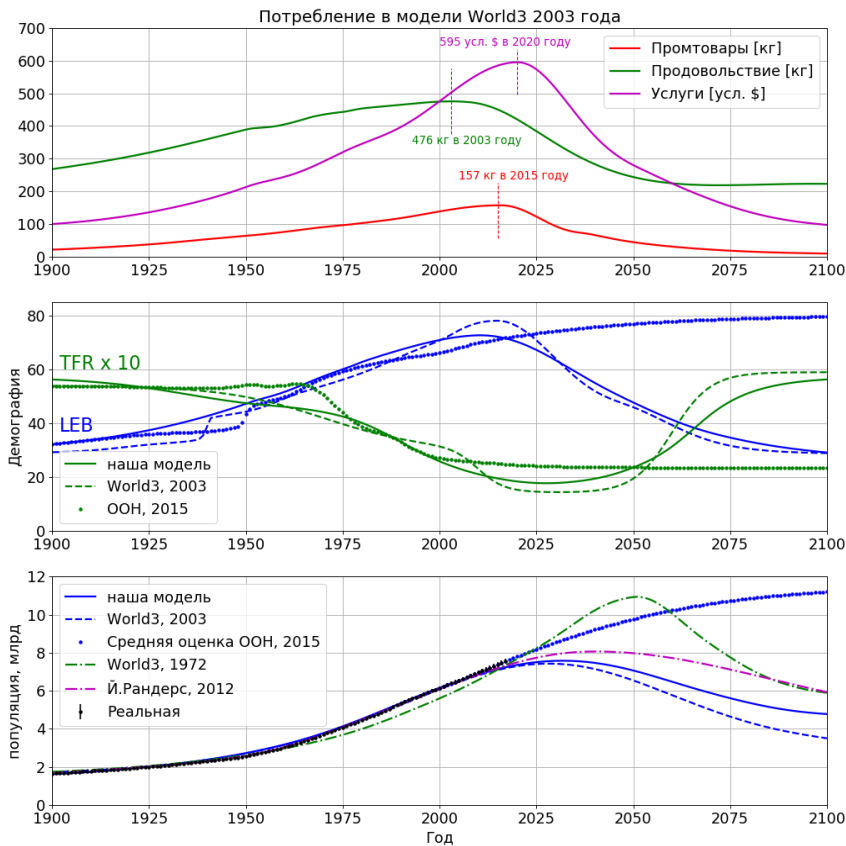
$$TFR(t)=F_5(t)=Sig\left(t,x_5=130,\sigma_5=0.030,FR_{max}=6,DFR(t)\right)\quad\{20.6\}$$

Модельные переменные подразделяются на **входные** и **выходные**. В нашей первой модели в качестве входных переменных выступают: (1) доступность

потребительских товаров, то есть количество потребляемых товаров на душу населения, (2) доступность продовольствия и (3) доступность «услуг».

Код модели, вместе со всеми тестами, находится в файле Цифрового приложения \Chapter 20\01_World3_Model.py, а наши результаты (непрерывные линии) сравниваются, во-первых, с моделью из «Пределов роста» 2003 года (пунктирные линии), во-вторых, с моделями 1972 и 2012 годов (штрих-пунктир) и в-третьих, с данными и прогнозом ООН 2015 года (точки).

Авторы «Пределов роста» заявляют в каждой книге, что их базовая модель является не предсказанием, а всего лишь одним из множества вариантов развития человечества. Мы знаем, однако, что наша цивилизация довольно уверенно движется по базовым кривым из модели 1972 года; во всяком случае, посчитанная на слабосильной «IBM-7090» базовая модель из далёких 1970-х оказалась в кризисном 2008 году куда ближе к реальности, чем выполненные на суперкомпьютерах оптимистические выкладки IEA из года 2000.



Наши входные переменные – это базовая модель «Пределов роста» 2003 года⁴¹⁶. Заметим, что моделирование выполнялось примерно за 5 лет до

416 Чтобы не было разночтений, придётся повторить: эти модельные переменные рассчитаны на Vensim за

Глобального финансового кризиса (GFC) и за 10 лет до начала Великой рецессии (GR).

- Максимум продовольствия на душу населения – 480 кг рисового эквивалента в 2003 году. Модель «*Пределов роста*» из 1972 года (далее BAU72) предсказывала максимум в 2012.
- Максимум потребительских товаров на душу населения – 160 кг эквивалента в 2015 году. BAU72 давала этот пик на пятилетку раньше, в 2010. В главе 9 мы по независимым данным вычислили максимум производства низкоэнтропийной энергии из ископаемого, в том числе ядерного, топлива на душу населения: 2100 ± 200 Вт мгновенной мощности, 2012 год.
- Максимум социальных «услуг» на душу населения – 600 УД в 2020 году. Это единственный пик, который вроде пока не наступил. BAU72 предсказывала его же в 2015. Впрочем, в области печатания фантиков трудно найти твёрдую калибровку, и этот пик мы сможем надёжно различить в статистике не ранее 2030 года. Если к тому времени такую статистику ещё будут публиковать в открытом доступе.
- Индекс (интегральный показатель) гуманитарного развития HDI вышел на «полочку» в 2006 и с тех пор не растёт. Модель предсказывает, что в 2019 наметится снижение.
- «Новый, 1930 год», согласно модели, наступит: по продовольствию – в 2032, по потребительским товарам – в 2051, по услугам – в 2076, по индексу гуманитарного развития – в 2063. В главе 16, по независимой модели Халла и Клитгаарда, мы получили энергетическое потребление на уровне Великой депрессии в начале 2060-х годов (диапазон неопределённости по запасам ископаемого топлива – от 2036 до 2081 года).
- Если «Новый, 1930 год» ждать ещё довольно долго, то «Новый, 1960 год» совсем не за горами: по продовольствию – в 2022, по потребительским товарам – в 2034 (натурально, в пределах пары-тройки лет погрешности). У модели супругов Медоуз и Й.Рандерса, похоже, есть неплохой шанс сбыться.

Разница между статистическими данными ООН и моделями по переменным **LEB** и **TFR** нас не должна особенно волновать до тех пор, пока модель хорошо описывает кривую народонаселения. Дело в том, что население в подавляющем большинстве стран мира сейчас измеряется физически – путём переписей, с заполнением данных между годами переписей либо (в странах с развитой бюрократией) по регистрации смертей и рождений, либо интерполяцией [13].

Исторические данные по **TFR** и **LEB** до 1950 года – всего лишь грубая оценка по демографической модели; тогда эти данные напрямую регистрировали

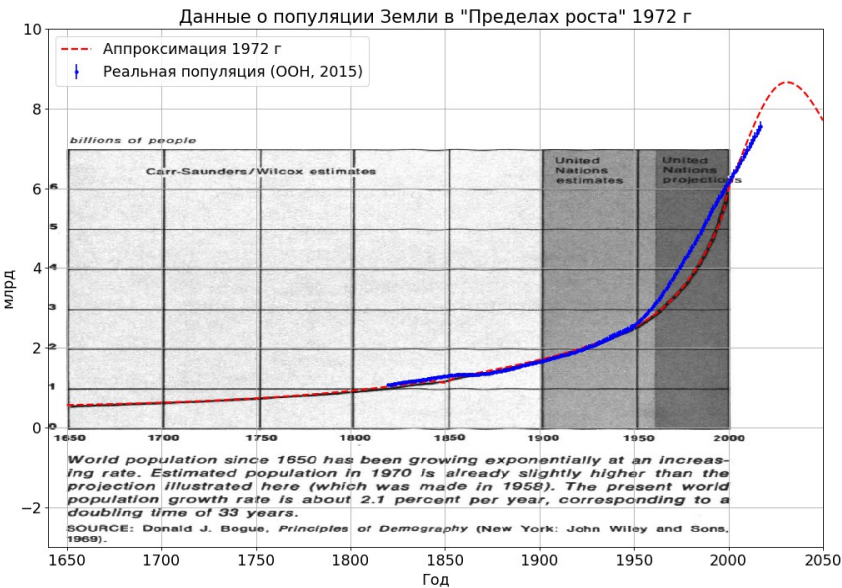
пределами нашей популяционной модели. Мы просто используем их для проверки.

лишь в США и некоторых странах Европы. Впрочем, в странах из «списка Чуковского» ничего такого не регистрируют и в компьютеризированном XXI веке.

DFR можно попытаться выяснить путём статистических опросов: «Какое количество детей в семье вы считаете оптимальным?» – либо изучением медицинских карточек в роддомах и абортариях. Такие данные не особо надёжны, а во втором случае ещё и представляют врачебную тайну. Ну и абортарии кое-где бывают нелегальными, в статистические органы отчего-то не докладывают.

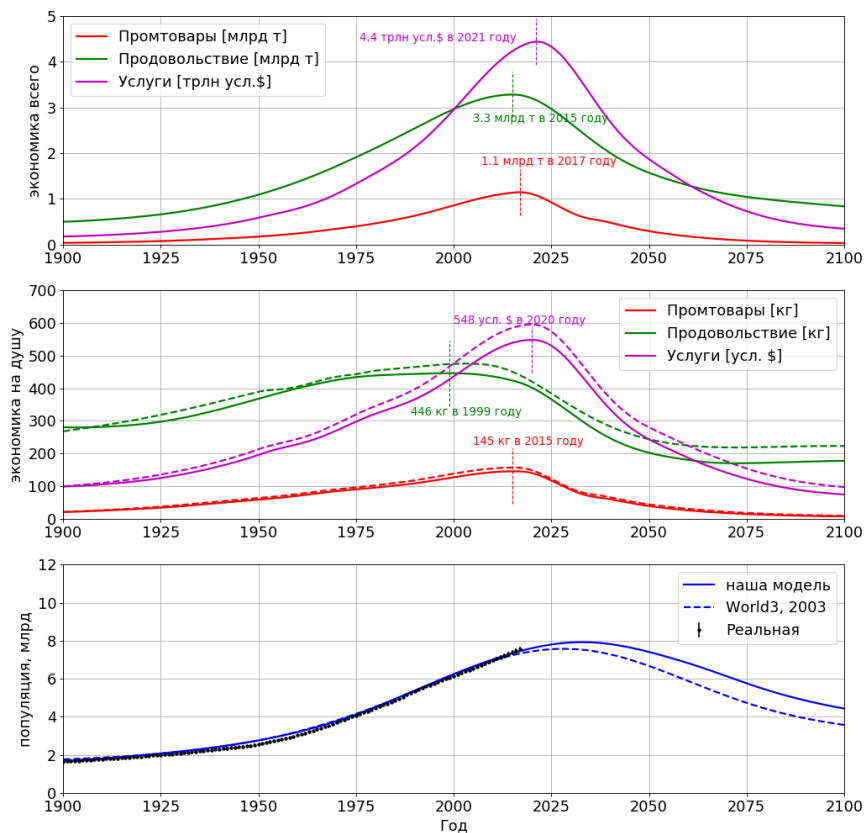
По данным ООН 2015 года, «скачок» **LEB** наблюдался с конца 1940-х до середины 1950-х, и связан, как полагают, с массовой вакцинацией от детских инфекций в «развивавшихся» в ту пору странах. При разработке модели 2003 года авторы «*Пределов роста*» пользовались какой-то более ранней статистикой ООН, а там «скачок» происходил... в 1940 году. Вас удивляет, отчего родившиеся в самом начале Второй мировой детишки внезапно стали дольше жить? Большинство пользователей данных ООН это тоже удивляло, но в бюрократической системе все научились хорошо скрывать удивление.

В данных ООН 1958 года никакого «скачка» не было, но там население планеты занижено примерно на 200-300 миллионов, так как по крайней мере Индия и КНР в то время демографические данные полагали государственной тайной – и не публиковали. На картинке ниже – оригинал графика по данным ООН из «*Пределов роста*» 1972 года с наложенными точками из последней, «самой наиболее правильной», статистики ООН из 2015.



Можно высказать гипотезу, что ООН собирает информацию по продолжительности жизни и фертильности от правительств конкретных стран.

года по продовольствию и потребительским товарам произойдёт примерно к 2055 году, однако население Земли будет к тому времени не 3.0 миллиарда, как в 1960, а 6.4 млрд человек, то есть в среднем на каждого жителя Земли товаров, еды и услуг получится вдвое меньше.



Переменные в модифицированной модели выглядят так:

№	Переменная	Тип	Описание	Начальное значение
1	Time	Входная	Модельное время, лет	1890
2	Goods	Входная	Выработка потребительских товаров, млн тонн в год	38
3	Food	Входная	Выработка продовольствия, млн тонн в год	413
4	Services	Входная	Услуги, млрд УД в год	153
5	Pollution	Входная (пока не используется)	Загрязнение окружающей среды, условных единиц	0
6	Population	Выходная	Народонаселение всего, млн	1'531
7	Labor	Выходная	Трудоспособное население, млн	833
8	GoodsPC	Выходная	Доступность потребительских товаров, кг на душу в год	25
9	FoodPC	Выходная	Доступность продовольствия, кг на душу в год	270
10	ServicesPC	Выходная	Услуги, УД на душу в год	100
11	LEB	Индикативная	Ожидаемая продолжительность жизни при рождении	33

№	Переменная	Тип	Описание	Начальное значение
12	TFR	Индикативная	Количество детей в среднем у женщины за весь период жизни	5.6
13	Total_Male	Индикативная	Количество мужчин, млн	754
14	Total_Female	Индикативная	Количество женщин, млн	777

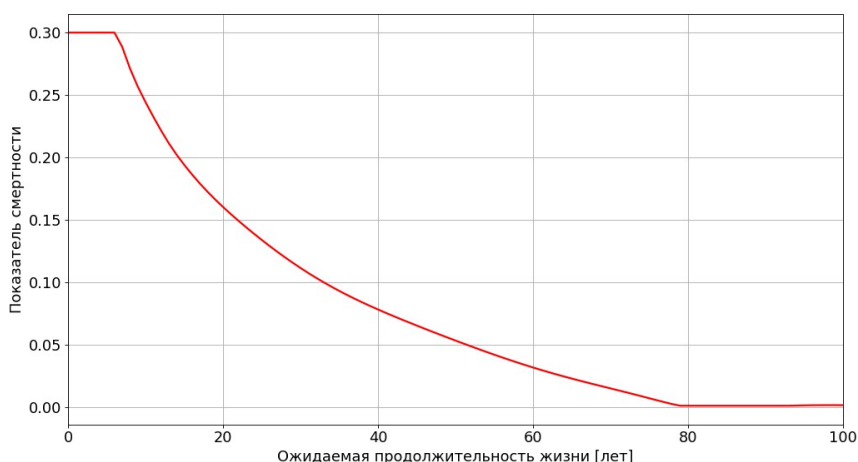
«Входные» переменные вычисляются за пределами нашей модели. Пока, просто для отладки, использованы значения базовой модели [3]. «Выходные» и «индикативные» переменные вычисляются нашим кодом. Индикативные переменные не используются нигде, кроме как в нашем модуле народонаселения; выходные переменные в дальнейшем будут использованы в других модулях разрабатываемой модели. Все параметры представлены в таблице:

№	Параметр	Описание	Диапазон значений	Принятое значение
1	m2f	Отношение мальчики:девочки при рождении	нет	1.05
2	ΔLEB	Разница в ожидаемой продолжительности жизни мужчины:женщины	нет	4 года
3	σ₁	Инкремент функции продолжительности жизни в доиндустриальном обществе	От 0.0045 до 0.0055	0.005 кг ⁻¹
4	LEB_{max}	Максимум LEB	От 80 до 100	90 лет
5	σ₂	Инкремент функции LEB от доступности услуг	От 0.010 до 0.014	0.012 УД ⁻¹
6	x₂	Центральная точка функции LEB от доступности услуг	От 180 до 220	200 УД
7	t₂	Задержка функции LEB от доступности услуг	От 15 до 35	25 лет
8	σ₃	Декремент функции DFR от LEB	От 0.10 до 0.40	0.25 год ⁻¹
9	x₃	Центральная точка функции DFR от LEB	От 45 до 65	55 лет
10	t₃	Задержка функции DFR от LEB	От 25 до 75	50 лет
11	σ₄	Декремент функции DFR от доступности товаров потребления	От 0.030 до 0.070	0.050 кг ⁻¹
12	x₄	Центральная точка функции DFR от LEB	От 100 до 140	120 кг
13	t₄	Задержка функции DFR от LEB	От 20 до 60	40 лет
14	DFR_{min}	Минимальное желаемое количество детей у женщины	От 1.00 до 2.00	1.45
15	DFR_{max}	Максимальное желаемое количество детей у женщины	От 4.20 до 5.20	4.70
16	σ₅	Декремент функции TFR от доступности услуг	От 0.01 до 0.05	0.030 УД ⁻¹
17	x₅	Центральная точка функции TFR от доступности услуг	От 100 до 160	130 УД
18	FR_{max}	Социально-биологический максимум TFR	От 5.0 до 8.0	6.00

В нашей модели кривая населения проходит несколько выше, чем в модели от авторов «*Пределов роста*». Это оттого, что мы пока не ввели зависимости продолжительности жизни от загрязнений окружающей среды. Соответственно, бóльшая популяция вызывает и несколько меньшее потребление на душу населения. Точная калибровка модели нас пока не заботит: точного соответствия данным статистики будем добиваться позже, когда будет построена окончательная модель, тем более что все «килограммы» и «доллары» у авторов «*Пределов роста*» всё равно условные.

Для полноты описания модели приведём демографические параметризации модели. Из переменной LEB вычисляется коэффициент возрастной смертности a_0 на первом году жизни. В первом приближении это гипербола, ограниченная сверху и снизу величинами 0.3 и 0.001 соответственно, то есть смертность младенцев от 300 до 1 на тысячу живых родов:

Зависимость показателя возрастной смертности от LEB



Далее из коэффициента a_0 вычисляются остальные возрастные коэффициенты смертности для матрицы Лесли {19.1}:

$$\vec{a} = \text{Bath}(\vec{t}, LEB_a = 5, \sigma_a = 1.0, LEB_b = 80, \sigma_b = 0.2, a_0, 0.1 a_0, 0.20) \quad \{20.7\}$$

Одновременно вычисляется массив коэффициентов биологической фертильности b для той же матрицы, а также коэффициенты w для количества рабочей силы – последняя переменная понадобится нам в дальнейшем:

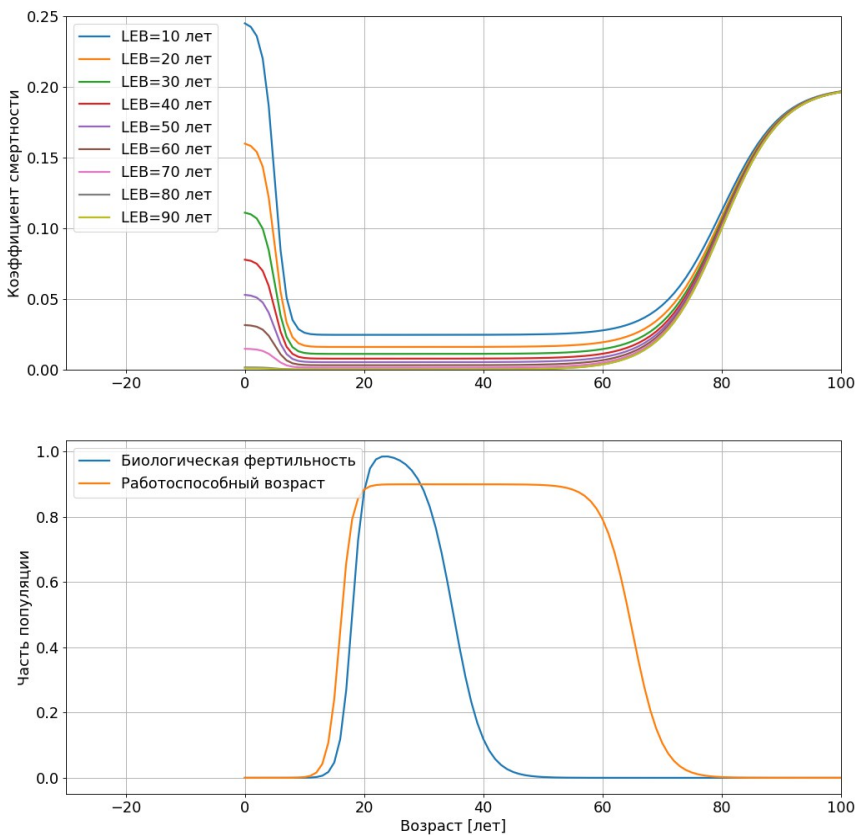
$$\vec{b} = \text{Bath}(\vec{t}, t_a = 18.0, \sigma_a = 1.0, t_b = 35, \sigma_b = 0.4, 0, 1, 0) \quad \{20.8\}$$

$$\vec{w} = \text{Bath}(\vec{t}, t_a = 16.0, \sigma_a = 1.0, t_b = 65, \sigma_b = 0.4, 0, 0.9, 0) \quad \{20.9\}$$

Вслед за авторами «*Пределов роста*» мы полагаем средний возраст первых родов 18 лет, а средний возраст вступления в трудовую жизнь – 16. Если быть

совсем точными, то это должны быть переменные величины – в более «цивилизованном» обществе и то, и другое наступает позже, чем в обществе «традиционном». Однако пока – вслед за авторами *World3* – оставим это параметрами, чтобы не усложнять модель.

Демографические зависимости в модели "World3"



Как подобает ~~извращённым математикам~~ честным инженерам, нам далее следует разобраться с двумя важными свойствами полученной математической модели: «чувствительностью к параметрам» и «стабильностью».

Если при незначительном изменении любого из параметров происходит резкое изменение поведения модели – то модель вряд ли адекватна. Скажем, при величине характерной задержки $\tau_2=25$ лет модель показывает пик населения 8 млрд в 2030 году, а при $\tau_2=26$ лет и прочих равных условиях – пик 50 млрд в 2031. Это то же самое, если самолётик взлетает на скорости 180 км/ч при оборотах двигателя 3'000, а при оборотах 3'150 – уже набирает первую космическую скорость и выходит на орбиту.

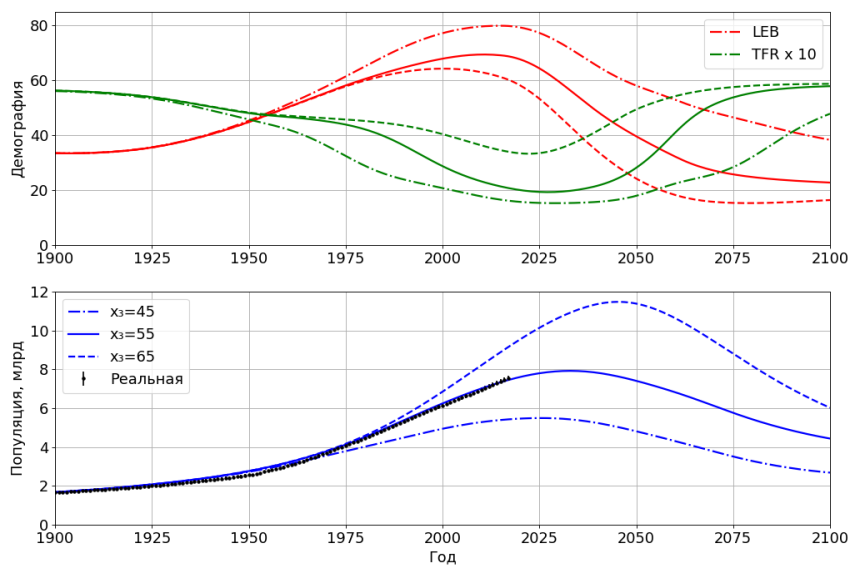
Надо отметить, что ни в одной из трёх книг из серии «*Пределы роста*» [1-3]

никакого исследования чувствительности к параметрам не упоминалось. Будучи специалистами в области моделирования и верными учениками Дж.Форрестера, авторы эту чувствительность наверняка проверяли, но документального подтверждения я найти не смог. В «Динамике роста в ограниченном мире» [7] и книге Й.Рандерса [18] вопросы чувствительности обсуждаются лишь в самых общих чертах. Можно высказать гипотезу, что авторы не захотели усложнять повествование лишней математикой либо просто считают *Vensim* непогрешимым.

В нашем коде проверяется чувствительность к 16 параметрам из 18; проверку биологического отношения мальчики:девочки при рождении **m2f** и разницу в продолжительности жизни между мужчинами и женщинами **ΔLEB** мы исследуем позже, когда будет полная модель.

Чтобы не загромождать текст, ниже приводятся только численные эксперименты по самым чувствительным параметрам из шестнадцати: **х₃** – центральная точка зависимости между **DFR** от **LEB** и **DFR_{max}**. Остальные графики доступны в Цифровом приложении. График ниже демонстрирует влияние параметра **х₃**. Наилучшее совпадение достигается при ожидаемой продолжительности жизни в 55 лет. Подвижка возраста на 10 лет в каждую сторону соответственно уменьшает или увеличивает рост населения в модели.

Чувствительность модели к параметру х₃

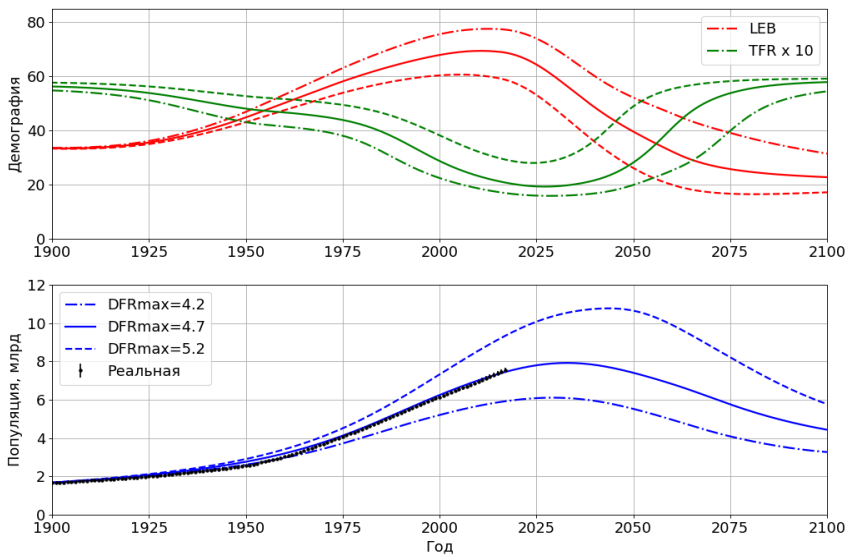


Изменение максимального желаемого количества детей в семье влияет аналогично: изменение со значения наилучшей подгонки 4.7 на 10% в каждую сторону сдвигает график населения вниз или вверх.

Возникает законный вопрос: может ли одновременное изменение *двух*

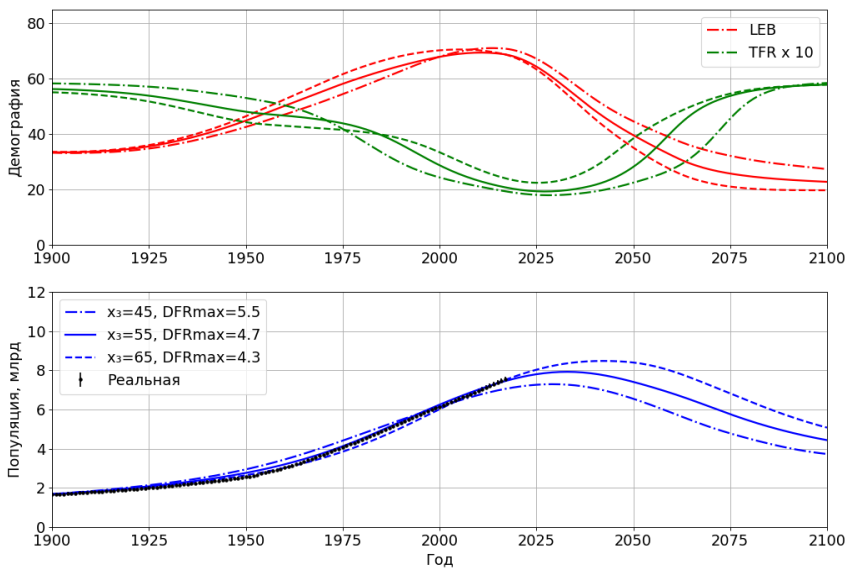
параметров – первого вниз, второго вверх и наоборот – вернуть график к «базовой» модели?

Чувствительность модели к параметру DFRmax



В качестве эксперимента попробуем подобрать наилучшие значения DFR_{max} для $x_3 = 45, 55$ и 65 лет. Наилучшее попадание на исторические значения статистики ООН 2015 года достигается при $DFR_{max} = 5.5, 4.7$ и 4.3 .

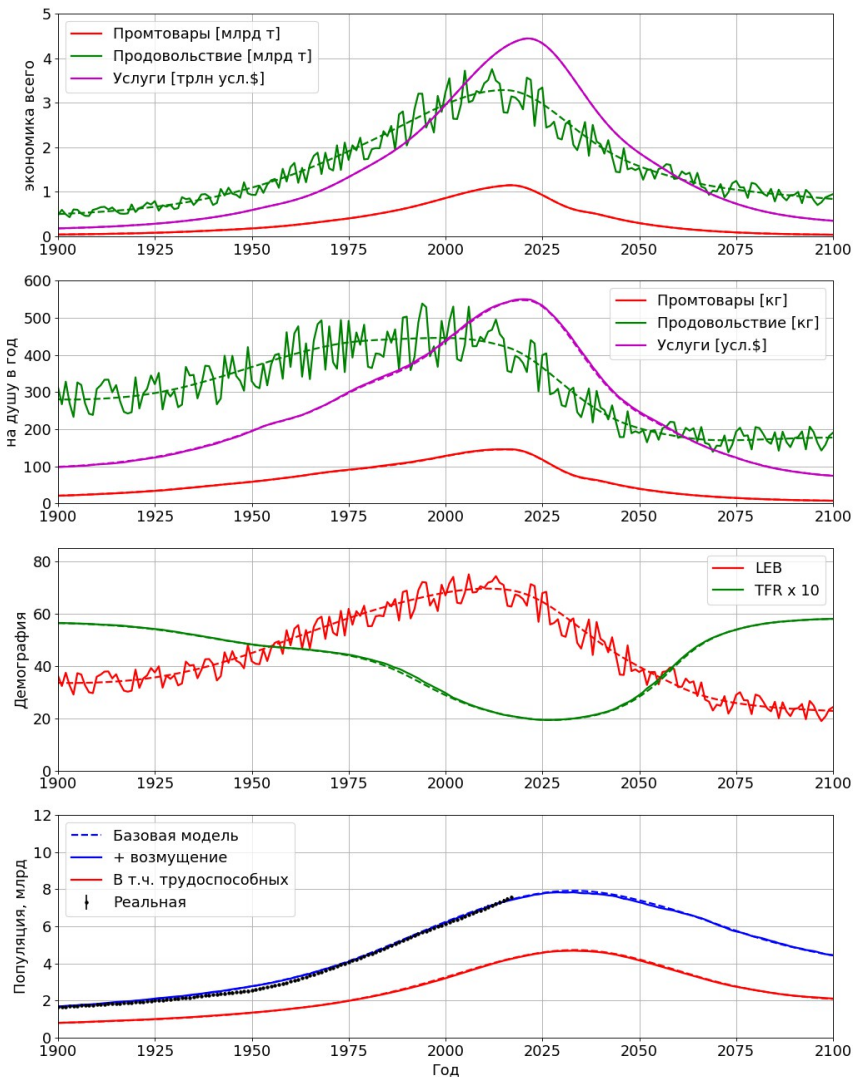
Чувствительность модели к параметрам x_3 и DFR_{max}



Заметим однако, что «альтернативные» параметризации несколько хуже описывают известные исторические значения народонаселения Земли.

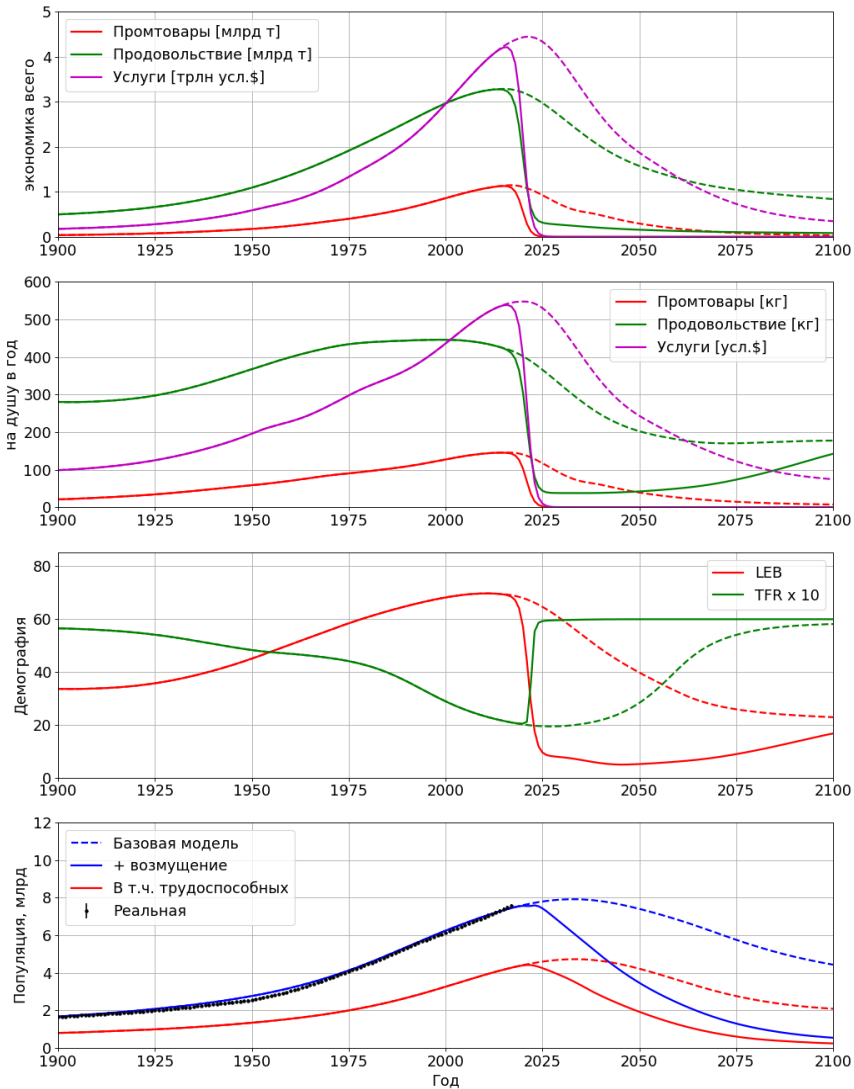
Критики «Пределов роста» зачастую указывают, что «уравнениями Медоуза можно нарисовать что угодно». Нарисовать-то можно, но нарисованное не будет соответствовать реальным данным статистики! Если же рисовать в соответствии с известными историческими значениями, какими бы они ни оказались в текущей версии демографической статистики ООН, – диапазон изменения параметров достаточно узок.

Устойчивость модели проверяется добавлением случайного сигнала к любой из входных переменных. Были опробованы все переменные по очереди, а также все вместе. Численный эксперимент показывает, что модель устойчива при случайных возмущениях более 20% от величины переменной. Ниже приводится эксперимент по переменной с наибольшим влиянием – выработка продовольствия, остальные графики – в Цифровом приложении; желающие могут сгрузить код и поэкспериментировать, в том числе, и с устойчивостью.



Исследование устойчивости путём добавления к переменным «катастрофического сигнала» оставлена на сладкое. Приятно жажнуть по модели каким-нибудь выдуманном катаклизмом и поглядеть, что получится. Единственный и притом очевидный способ выморить население – вывести производство продовольствия в ноль. Такой эксперимент тоже проводился и показал, что население в модели сокращается до нуля примерно за 2 года – тривиальный результат приводить здесь не будем.

Поместим условный катаклизм в 2020 год. Там одновременно произойдёт снижение производства продовольствия на 90%, полное уничтожение «услуг» (в том числе государственной власти) и промышленного производства. Любители научной фантастики могут обсудить причины: извержение супервулкана, удар суперметеорита, глобальная ядерная война и т.п.



Даже при таком невероятном сценарии, срыва в нашей демографической модели не происходит, а население плавно снижается. Полученные нами модельные значения: **LEB**<10 лет, **TFR**=6, естественная убыль населения 5.5% в год.

Конечно, вероятность подобной катастрофы в пределах всей планеты довольно мала – что совершенно не мешает хардкорным выживальщикам копать схроны, закупать топоры, стволы и тушняк и каждый выходной отрабатывать эвакуацию своей тушки подальше от города в девственную природу.

У выживальщиков есть достойное оправдание: если не в масштабе планеты, то в масштабах отдельных стран подобные социальные эксперименты ставились неоднократно. Пожалуй, наиболее «чистым» – если такое слово вообще уместно – был «эксперимент» в многострадальной Камбодже времён Пол Пота (настоящее имя пламенного революционера – Салот Са-ар, 1925-1998). Под такой эксперимент угодить – и врагу не пожелаешь.

Шестнадцатого апреля 1975 года народно-освободительная армия Красных кхмеров вошла в Пномпень. Примерно за две недели все горожане воленс-ноленс стали выживальщиками и эвакуировались в ~~деветвенные~~ деревенские коммуны. Показанные Голливудом окружённые автоматчиками бесконечные пешие колонны не соответствуют воспоминаниям очевидцев – первую неделю беженцы отбывали добровольно и большинство на транспорте: от джипов⁴¹⁷ и автобусов до велосипедов. Колонны были в последние дни – когда «Комитет» проводил окончательную зачистку тех, кто уезжать добровольно не захотел. Впрочем, Красные кхмеры почти полностью выселяли все захваченные города ещё в конце 1960-х, задолго до своей полной победы.

Говорят, будто деньги и торговлю ликвидировали по приказу Пол Пота за один день. Это тоже не совсем верно. Выжившие вспоминают, что риель находился в ограниченном обращении примерно до конца 1975 года, но купить что-либо было затруднительно. Далее выпускник Сорбонны с верными товарищами принялся за транспорт и промышленность. В нищей аграрной стране эти отрасли и так не были особо развиты, но Пол Пот вероятно ставил задачу именно полного уничтожения товарного производства и перехода к натуральному хозяйству. Английская Википедия⁴¹⁸, ссылаясь на журналиста Филипа Шорта⁴¹⁹, пишет, будто

Пол Пот ставил для Кампучии на следующие 5-10 лет задачу механизации сельскохозяйственного производства на 70–80%, с последующим созданием в течение 15–20 лет современной индустриальной базы и превращением страны в самодостаточное государство[...] Чтобы избежать иностранного господства в промышленности, Пол Пот отказался закупать товары из других стран.

Не исключаю, что журналист честен, а нечто подобное Пол Пот вещал иностранным корреспондентам, приезжая на побывку в Пекин, – Шорт именно

417 Sovannora Ieng, *Surviving Year Zero: My four years under the Khmer Rouge*, the Five Mile Press, 2014, ISBN 9781760063641.

418 https://en.wikipedia.org/wiki/Pol_Pot, ссылка на книгу Ф.Шорта в версии 2005 г.

419 Используется другое издание: Short, Philip, *Pol Pot: Anatomy of a Nightmare*, 2006, ISBN 0805080066

там Пол Пота и встретил. Реальность страны была другой. Польский военный журналист Веслав Гурницкий⁴²⁰, попавший в Демократическую Кампучию вместе с тыловыми частями Народно-Освободительной армии СРВ в январе 1979, описывает так:

Вскоре выяснилось, что путешествовать по Кампучии армейским вездеходом — настоящая пытка. Полотовские саперы вывели из строя практически все дороги с твердым покрытием, не только постоянным, но и временным. Каждые семьдесят или сто метров проезжую часть пересекает узкая канава глубиной в двадцать сантиметров. Пройтая киркой до самой нижней глиняной подушки, канава напоминает рубленую рану после удара топором.

Уничтожение дорог только отчасти можно мотивировать военными соображениями. В основе же лежали, как нам было объяснено, главным образом идеологические постулаты, доктрина повсеместной прикрепленности населения, ненависть ко всем механическим средствам передвижения, ставшая уже философией. Народ, как твердили полотовские идеологи, получает в коммунах все необходимое для жизни и, следовательно, не имеет никаких поводов передвигаться по стране[...] самовольный уход из коммуны карался чаще всего смертью, как дезертирство с трудового фронта, а разрешения принципиально не выдавались, так как не было такой необходимости. Почта перестала существовать. Медицинское обслуживание было ликвидировано. Товарообмен прекратился[...]

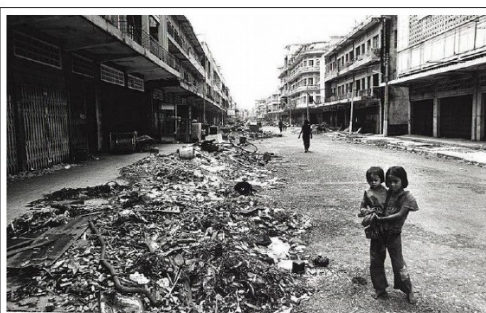
Разрушение дорог началось во второй половине 1975 года [то есть сразу после окончательного выселения городов — М.Я.] Оно продолжалось до последних месяцев 1978 года [то есть до самой интервенции НОА в декабре], в заключительной фазе уничтожению подлежали мосты и насыпи. Трех лет более чем достаточно для страны со столь редкой сетью дорог.

Никакой механизации сельского хозяйства за три с половиной года «глубоких социальных преобразований» не наблюдалось, а вследствие недостатка мотыг и лопат для возделывания земли использовали что под руку попадёт: от расплюснутых сковородок до осколков американских авиабомб.

Кое-где пишут, будто в коммунах всем поголовно выдали «чёрные пижамы» — партизанскую униформу вьетнамского пошива — по одному комплекту на год. Это тоже в среднем воспоминаниям очевидцев⁴²¹ не соответствует. Униформу выдавали проверенным кадрам Красных кхмеров, а снабжение остальных элементарными потребительскими товарами проводилось за счёт старых запасов. Полоса мусора на фото справа — следы уничтожения мебели. В Пномпене работали бригады подростков, в задачу которых входил сбор одежды и посуды — для последующей отправки в деревни. Всё, что не подходило под эти две категории, выбрасывали из окон и сжигали.



Эвакуация Пномпеня, апрель 1975. Автомобили есть, а автоматчиков не видно.



Тот же город в середине 1979 г.

420 Цитируется по сокращённому переводу Б.Ф.Стахеева: Гурницкий Веслав, «Песочные часы», Радуга, Москва, 1983.

421 Sovannora Ieng, см. ссылку 417.

Знали ли о реальном положении дел в высшем руководстве Коммунистической партии Китая? Точного исторического ответа нет и вряд ли он будет. Равновероятны две гипотезы: (1) в ЦК КПК подозревали, что всё идёт не совсем так, как докладывает товарищ Пол Пот, но предпочитали молчать в тряпочку, и (2) эксперимент ставился сознательно, а Камбоджа, с её прогрессивным принцем Сиануком, американскими бомбардировками «Тропы Хошимина» и Красными кхмерами в джунглях, просто оказалась как нельзя кстати – проводить опыты такой магнитуды над собственным народом китайские коммунисты посчитали неуместным. Так или иначе, именно в 1979 году ЦК КПК закончил экспериментировать с плакатами и брошюрами относительно мягкой политики «одна семья – два ребёнка» и перешёл к драконовским мерам чисто-экономической политики «одна семья – один ребёнок». Просто совпадение по времени? Я так не думаю!

О Кампучийском социальном эксперименте можно писать долго, но нас он интересует не просто так, а для калибровки нашей модели к экстремальным обстоятельствам. Население Камбоджи сократилось с примерно 7.9 млн жителей по состоянию на начало 1975 года до 6.7 млн в начале 1979, то есть за полные четыре года – относительное сокращение по 6.0% в год⁴²². Дополнительная смертность сверх естественной за 4 года – около 2'120 тыс человек. Дабы не вызывать политический срач, укажем, что большинство умерших не являются *прямыми* жертвами репрессий. Сюда также входит от 170 до 330 тыс Красных кхмеров, погибших на боевом посту либо впавших в мелкобуржуазный уклонизм и подвергнутых крепкой товарищеской критике. Документированные массовые казни (удобренные трупами горожан поля и тому подобные ужасы) составляли лишь 8% от числа погибших, остальная смертность – просто от голода и болезней. Младенцев точно никто не казнил – умирали сами. Про ограничение рождаемости Красными кхмерами данные противоречивы. Гурницкий сообщает на основании интервью с выжившими, что городским эвакуантам – это «граждане третьей категории» – не разрешалось иметь детей. С другой стороны, сохранились свидетельства о «коммунистических линейках», когда деревенских женщин оплодотворяли чуть не насильно.

Полученные нами модельные значения (**LEB**=10 лет, **TFR**=6, естественная убыль населения 5.5% в год) хорошо соответствуют статистике Камбоджи – к счастью, «натурный эксперимент» там продлился всего четыре года. Похоже, наша модель неплохо работает даже в самых экстремальных предположениях – вряд ли где-то ситуация будет хуже. К сожалению, многие страны от социальной катастрофы ничем не застрахованы. Вот что написал нам из

422 Bruce Sharp, *Counting Hell*, <http://www.mekong.net/cambodia/deaths.htm> приводит обзор оценок: отчёт ЦРУ (1979 год) – 900 тыс дополнительной смертности за 4 года; опрос Б.Киернана (1981-82) – от 1.19 до 1.89 млн; статистическая оценка М.Викери (1984) – 740 тыс; оценка К.Этчинсона на основании раскопок массовых захоронений (1994) – от 2.0 до 2.5 млн (наиболее вероятное значение 2.2 млн); оценка Патрика Хеувелина (1999) – от 1.17 до 3.42 млн (наиболее вероятное значение 2.52 млн). По состоянию на 2016 год объективно установлены массовые захоронения 1'386'734 человек – их в Камбодже считают с точностью до единицы по черепам! Сам Шарп оценил дополнительную смертность числом между 1'747 и 2'495 тыс (наиболее вероятное значение 2'120 тыс).

6-3: Гонка, чтобы проиграть последним

Не так давно, на официальном приёме, я спросил у одного из высокопоставленных дипломатов, какой из всех возможных сценариев для Пакистана выглядит самым позитивным. Сидящие за столом нервно рассмеялись.

Ответ дипломата оказался на удивление честным. Она признала, что у неё вообще нет позитивного видения для Пакистана! Дипломат выразила мнение из тех, что лидеры многих стран придерживаются в тайне, но редко признают публично: человечество находится на опасном пути истощения природных ресурсов. Притом маловероятно, что лидеры могут что-то с этим поделать. Сейчас их работа заключается в том, чтобы их народы не потеряли последнее. На практике это означает, что для своего народа каждый хочет вырвать достаточное количество ресурсов из непрерывно сокращающегося ресурсного пирога планеты. «Моему народу хватит, и плевать на всех прочих!»

В первую очередь, в «ресурсной гонке 2052 года» население защищает сильная финансовая система. Оттого руководители ставят своей основной целью опережающий рост ВВП.

С точки зрения ресурсов прогноз для Пакистана не выглядит радужным. Биоёмкость страны крошечная, менее 0,6 гектара общей территории на душу населения [М.Я.: сравним с Великобританией, где всего 0,44 га], то есть около одной трети среднемирового показателя, а запросы населения растут. Потребности Пакистана уже на 80% превышают биопотенциал страны. Не нужно быть математическим гением, чтобы сделать вывод: при нынешних тенденциях роста населения и материальных ожиданий, – принимая во внимание ограниченную биоёмкость и увеличение издержек на добычу ископаемого топлива – у Пакистана просто не хватит ресурсов до 2052 года. Скорее всего, отсутствие дополнительной биоёмкости проявится в форме усиления социальных конфликтов. Цена конфликтов высока – значительное сокращение средней продолжительности жизни населения. Разумеется, такой распад может иметь катастрофические последствия и для всей планеты, не в последнюю очередь из-за пакистанского ядерного арсенала. К 2052 году Пакистан вполне может стать децентрализованным государственным образованием, с сотнями раздробленных феодальных владений, средневековыми уровнями детской смертности и очень низкой грамотностью.

Конечно, Пакистан попытается импортировать необходимое. Но в мире глобального голода, в условиях, когда население планеты далеко перевалило предел возможностей планеты, представляется маловероятным, что финансово слабый Пакистан сможет успешно бороться с более развитыми странами за остатки ресурсов.

Пакистан может пойти другим путём. Заявить населению, что дефицит ресурсов – явление отныне постоянное, значит, следует обуздать потребности, чтобы сохранить планету для будущих поколений. Достигнуть общественный консенсус среди пакистанцев будет непросто. Потребуется совершенно новое видение развития, включая центральную роль для женщин. Однако, если удастся справиться с социальными последствиями ужесточения экологических и физических ограничений, для пакистанцев будут обеспечены гораздо более благоприятные условия жизни.

К сожалению, Пакистан, как и большинство стран мира, вряд ли будет действовать подобным образом. Политики ослеплены двумя неправильными представлениями: во-первых, что нечего противопоставить относительно медленной, но неуклонной деградации окружающей среды, ни с точки зрения сокращения спроса, ни со стороны новых технологий; во-вторых, если и можно что-то сделать, то решение будет слишком тяжёлым и достижимым лишь на основе глобального консенсуса. Оба заблуждения ведут к параличу политической воли и дезинформируют население. Да, тенденции потребления ресурсов имеют огромную инерцию, они построены на прошлом и настоящем социальном выборе. Потребление ресурсов в значительной степени обусловлено численностью населения и уже существующей инфраструктурой: городами, электростанциями, дорогами и аэропортами. Изменяя тенденцию в области народонаселения и перестраивая инфраструктуру, можно уменьшить зависимость от импорта. Но как? Пакистан, как любая страна, должен начать управлять своими экологическими активами так, как управляют хорошей семейной фермой.

Хорошая семейная ферма производит больше, в чистом выражении, чем потребляет фермерская семья. Хороший фермер имеет достаточно земли для выращивания сельскохозяйственных культур и откорма скота. Только излишки производства, превышающие собственное потребление, могут быть проданы в обмен на другие товары и услуги: телевизоры, одежду, книги... Сейчас некоторые страны похожи на хорошие семейные фермы, с большей биоёмкостью, чем необходимо для обеспечения их населения продовольствием.

423 <http://www.2052.info/glimpse6-3/>

Сравните это с хобби-фермой (дачей), где хозяин разводит цветы или кроликов, а большинство еды покупает в магазине. В настоящее время 80% мирового населения проживает в странах, подобных таким «дачам». В чистом выражении они потребляют больше, чем позволяет экосистема страны. Остальное импортируется или получается из разрушительного сверх-интенсивного природопользования.

Фактически весь мир стал «дачей», используя в 1,4 раза больше, чем биосфера может произвести. Разница между тем, что обеспечивает природа и тем, что забирает человечество, приводит к амортизации «природного капитала». Под вроде бы небольшие проценты мы берём займы у будущих поколений.

Если бы мы смотрели на мир как добрые хозяева, мы бы признали, что в наших интересах заботиться о нашей ферме. Мы увидели бы опасность превращения всей планеты в «дачу», где всё меньше места, чтобы выращивать нужное. Страны знали бы, что нужно заботиться о собственных ресурсах и сдерживать их потребление, чтобы быть сильными и независимыми. В качестве бонуса, подобный подход стабилизирует и глобальную ситуацию. Следует максимизировать не пропускную способность (то есть ВВП), а природный капитал на душу населения, используя устойчивую отдачу от этого капитала для поддержания благополучия в будущем.

Возможно, мудрость придет, когда цены на ресурсы начнут расти быстрее, чем расширяется экономика. Когда такой момент настанет, «рост» экономики станет как бег вверх по едущему вниз эскалатору. Но подвигнет ли понимание принимающих решения лиц на быстрые и решительные действия? Боюсь, что нет. По мере уменьшения налоговых поступлений правительства прекратят инвестировать, даже в области образования и инфраструктуры. Населению прикажут спасаться индивидуально, один-на-один против всё более высокой стоимости продовольствия и энергии. Национальные банкротства станут частым явлением.

Другими словами, ограничения ресурсной базы приведут к социальным расстройством задолго до того, как начнется экологический колапс: мы увидим в меню и деградацию покупательной способности, и невозвратные кредиты, и банкротства, и гражданское неповиновение, и локальные войны.

Мы станем наблюдать за ходом этих событий и оттого не заметим глубинные причины: истощение ресурсной базы. Так произошло, например, во время «арабской весны» 2011 года. Восстание против репрессивных лидеров рассматривалось большинством как позитивное развитие демократии, но в реальности социальное разложение было вызвано не стремлением к свободе, а почти исключительно быстрым ростом населения в регионе и, как прямое следствие, – ростом цен на продовольствие и энергию. Даже самые циничные диктаторы не смогли удержать от бунта голодные массы[...]

Подведём итоги главы:

- Нами воспроизведён модуль народонаселения из модели *World3*. Математика слегка усовершенствована по сравнению с версией на *DYNAMO* или *Vensim* – у нас мужчины и женщины считаются отдельно, а моделирование популяция выполняется не четырьмя экспоненциальными задержками *Vensim*, а непрерывной матрицей Лесли, как описано в главе 19. Воспроизводится расчёт 5 основных и 4 индикативных переменных модели *World3*.
- Полученная модель проверена на чувствительность к 16 параметрам и на устойчивость по всем 3 входным переменным.
- Модель *World3* основана на годной математике. Обвинения пропагандистов о том, что «в такой модели можно нарисовать что угодно», несостоятельны. Что угодно нарисовать не получится; при существенном изменении входных параметров модель *перестает соответствовать историческим данным*. Все параметры модели неплохо обоснованы статистикой. Так же несостоятельны и

аргументы, что «графики в модели подтасованы». Независимое решение тех же дифференциальных уравнений на независимом программном обеспечении даёт весьма похожий (но не идентичный) результат.

- В отличие от идеалистической «теории» демографического перехода Томпсона и Ноутштейна, популяционная модель *World3* – вполне материалистическая.
- При снижении *доступности* потребительских товаров, продовольствия и «услуг» (то, что Ноутштейн в совокупности, вероятно, называл «модернизацией») в модели наблюдается «обратный демографический переход» – сокращение ожидаемой продолжительности жизни **LEB** при одновременном повышении рождаемости **TFR**. Оба процесса могут идти независимо, так как управляются экономическими (материальными) факторами.
- Возможна ли скоростная глобальная катастрофа – «обрыв Сенеки» как называет его Уго Барди [15] – вопрос открытый. Процесс, вероятно, будет проходить разновременно и с разной скоростью в разных странах мира. Модель *World3* показывает, однако, что даже при плавном снижении производства товаров, продовольствия и услуг обратный демографическому переход, к сожалению, неизбежен.