ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 92 за 2015 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Подлазов А.В.

Технологический императив как основа теории глобального демографического процесса

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Подлазов А.В. Технологический императив как основа теории глобального демографического процесса // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 92. 32 с.
URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-92

О р д е н а   Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й   а к а д е м и и   н а у к

А.В. Подлазов

Технологический императив как основа теории глобального демографического процесса

Москва — 2015

А.В. Подлазов

Технологический императив
как основа теории глобального демографического процесса

На протяжении почти всей истории человечества его численность росла в режиме с обострением. Однако в последние десятилетия рост стал замедляться и наметилась тенденция к стабилизации населения.

В работе введено понятие о жизнесберегающих технологиях, развитие которых трактуется как двигатель истории, и сформулирован принцип технологического императива, прямо привязывающий число живущих людей к уровню технологического развития. На этой основе построена математическая модель глобального демографического роста и определены его пределы. По мере приближения к ним происходит демографический переход, для которого предложена феноменологическая модель, хорошо согласующая с данными.

Ключевые слова: теоретическая демография, глобальная демография, гиперболический закон, режимы с обострением, демографический императив, технологический императив, жизнесберегающие технологии, демографический переход, пределы роста, возрастная пирамида

A.V. Podlazov

Technological imperative as basis for the theory of global demographical process

For most of history of mankind, its population grew with blow-up. However, the growth slows down in last decades and tends to stabilization.

We introduce the concept of life-saving technologies, which development is treated as the engine of history, and formulate the principle of the technological imperative, which directly binds the number of living people to the level of technological development. On this basis, we build a mathematical model of global population growth and identify its limits. As far as mankind approaches them the demographic transition occurs, for which we propose a phenomenological model in good agreement with the data.

Key words: theoretical demography, global demography, hyperbolic law, blow-up growth, demographical imperative, technological imperative, life-saving technologies, demographical transition, limits of growth, age pyramid

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №15-01-07944-а).

Введение

Демографический императив

Оборотной стороной любого развития являются кризисы, возникающие в результате его успехов. *Кризисы развития* обусловлены достижением его естественных пределов или дисбалансом его различных сторон.

В настоящее время человечество столкнулось сразу со множеством кризисов такого рода. Среди них исчерпание невозобновляемых ресурсов и климатические изменения, возрастающая уязвимость инфраструктуры и усиление террористической угрозы, появление новых смертельных болезней и ухудшение экологии, а также неустранимые противоречия между технологическим совершенствованием и нравственным вырождением, между глобализацией мировой экономики и ростом экономического неравенства…

Однако главный кризис развития связан не с какой-то конкретной сферой человеческой деятельности, а с самой сутью прогресса, начавшегося в тот момент, когда наши предки вышли из животного мира. В этот момент завершилась эволюция и началась история, которая вся суть *переходный процесс*. И, как любой переходный процесс, история, имея начало, должна иметь и конец, для понимания природы которого необходимо дать ответ на ключевой вопрос: что движет историю?

Важным шагом на пути к ответу стала формулировка С.П. Капицей принципа *демографического императива* [1,2], постулирующего демографическую обусловленность многих явлений и процессов, изучаемых общественными науками. С точки зрения синергетики [1] этот принцип сводится к утверждению, что в наборе переменных, описывающих крупномасштабные социальные, исторические, культурные, экономические и т.п. процессы, численность населения на значительных временах является параметром порядка, т.е. той ведущей медленной переменной, к которой подстраиваются все прочие.

Иными словами, демографический императив предлагает рассматривать ход истории как следствие увеличения народонаселения. Этот процесс, изображенный на рис. 1, действительно грандиозен в своих неуклонности и масштабе, так что он может служить если и не причиной, то хотя бы наглядным индикатором исторических изменений. И перенос внимания с истории на демографию оправдан уже тем, что в последней намного проще проведение количественного анализа.

Вместе с тем, опора на принцип демографического императива является попыткой объяснения неизвестного через непонятное. Как неизвестно, что движет историю, так же и непонятно, почему растет население. Но чтобы понять, почему оно растет, надо знать, как это происходит.

Принципиальной особенностью демографического процесса является то, что на протяжении большей части истории он шел с ускорением, которое лишь недавно сменилось замедлением. Ускоряющийся характер роста выражается в том, что со временем увеличивается не только численность населения, но также его годовой *прирост* (производная) и даже *темп прироста* (логарифмическая производная), динамика которых представлена на рис. 2. Переход от ускорения к замедлению породил феномен демографического взрыва – концентрацию радикальных популяционных изменений на узком временном интервале.

Количественное описание роста

Того, что показано на рис 1 и 2, уже достаточно, чтобы сформулировать основные вопросы, на которые должна ответить демографическая теория:

1) почему численность вида Homo Sapience вообще растет, тогда как численность любых иных видов, занимающих некоторую экологическую нишу, остается в среднем постоянной?

2) почему темп прироста народонаселения увеличивался, тогда как даже вид, осваивающий новую экологическую нишу, характеризуется постоянным темпом прироста своей численности?

3) почему в настоящее время происходит замедление роста человечества?

4) каковы перспективы демографического развития?

Чтобы найти ответы на эти вопросы, необходимо перейти от качественного описания роста к количественному. На рис. 3 представлена аппроксимация зависимости численности населения от времени формулой

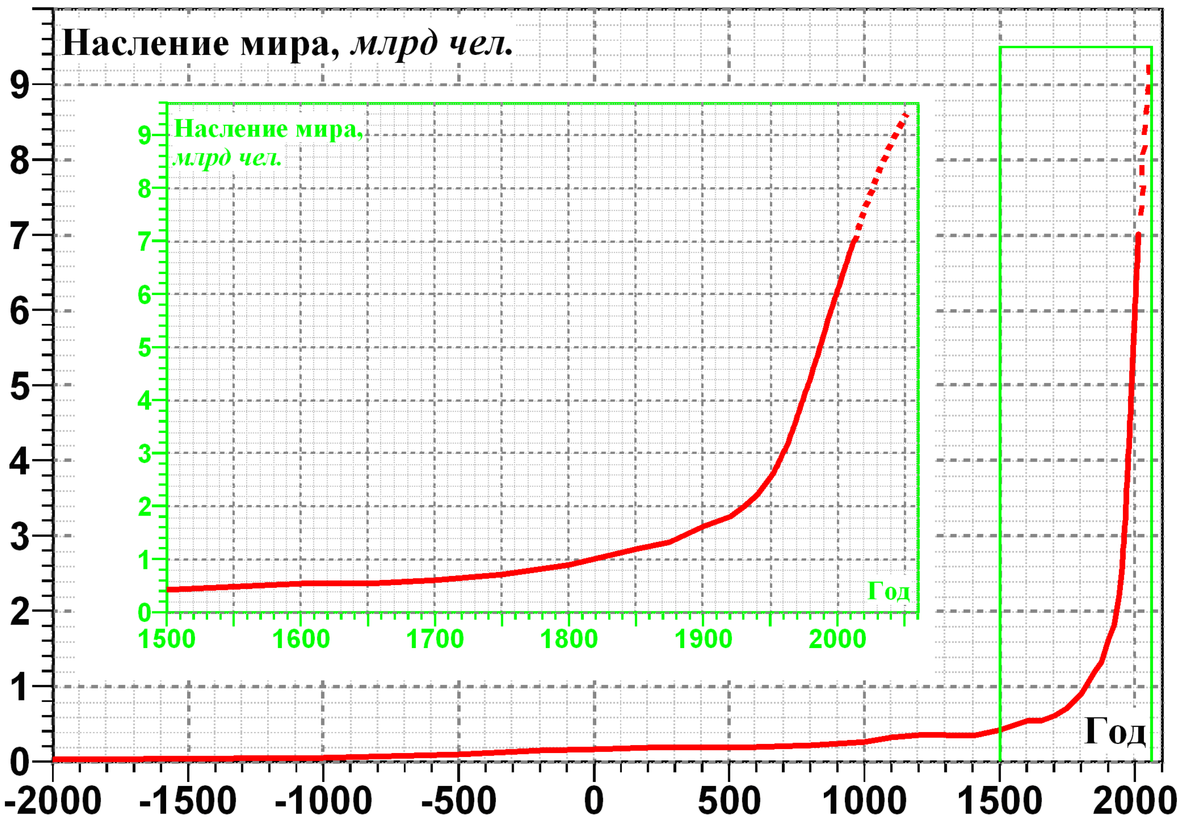


Рис. 1. Рост населения мира

Демографический рост является практически монотонным и неравномерным по времени. По данным [3,4]. Пунктиром показан прогноз до 2050 г.

$$n(t)=\frac{C}{t_f-t}, \tag{1}$$

где $C \approx 200$ *млрд чел.·год*, а *момент обострения* t_f приходится на 2025 г.

Зависимость вида (1) была впервые обнаружена в 1960 г. [5]. Любопытно, что вскоре после открытия она перестала работать (см. врезку к рис. 3), что неудивительно, т.к. эта формула, становящаяся абсурдной при приближении t к t_f, очевидно, не может быть экстраполирована в будущее. Однако ее экстраполяция в прошлое, как можно видеть из рис. 4, находится в удовлетворительном согласии с демографическими данными, дополненными оценками антропологов и палеодемографов.

Иными словами, закон роста (1) справедлив на протяжении всей истории человека как вида за исключением нескольких последних десятилетий. Этот длительный период развития будем называть *фазой роста* в противоположность происходящему в настоящее время глобальному *демографическому пере-*

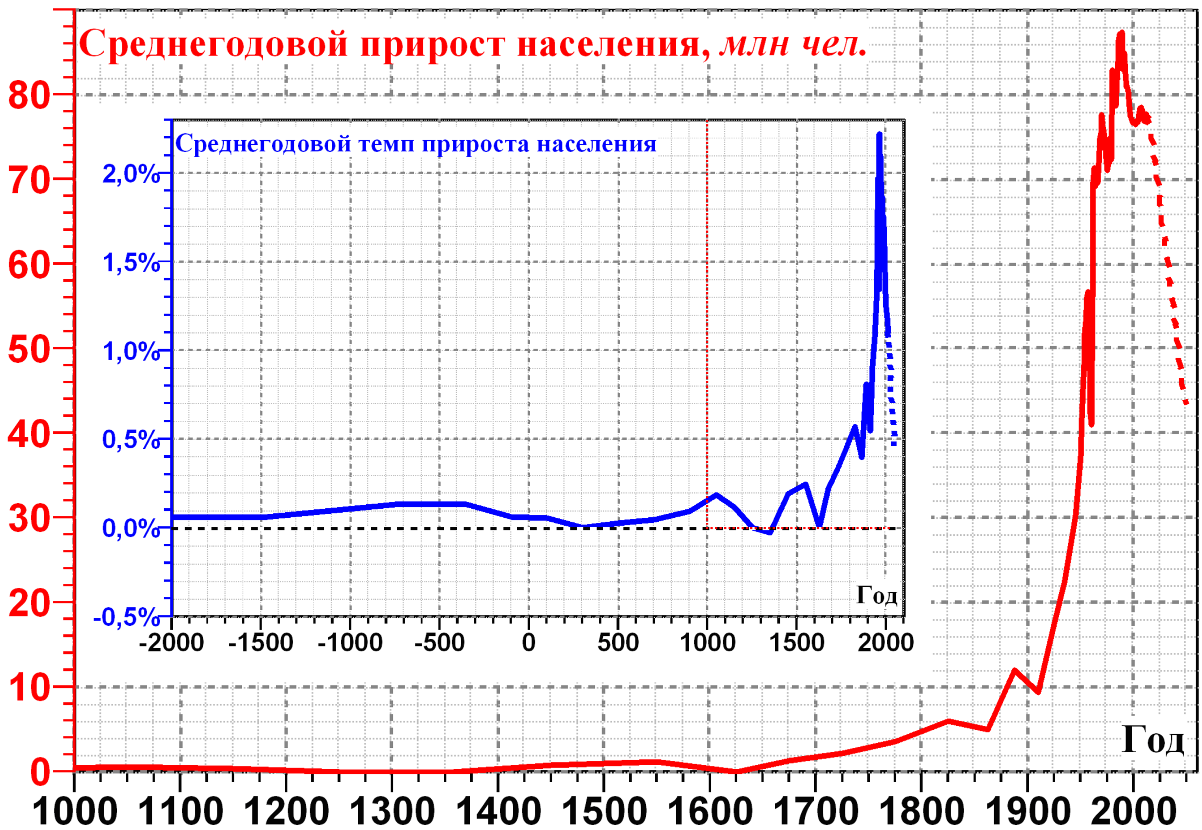


Рис. 2. Демографический взрыв

Рост народонаселения подвержен флуктуациям, которые ранее могли приводить даже к его кратковременному снижению. Однако благодаря ускорению демографического роста он уверено поднимается над нулевой отметкой начиная с XVII в.

Максимальный годовой прирост населения в 88 *млн чел.* имел место в 1989 г., а темп прироста прошел пик в 1963 г., достигнув 2,2% *год*$^{-1}$, после чего эти величины начали убывать.

По данным [3,4].

ходу, связанному со сменой типа воспроизводства населения. В результате демографического перехода происходит замедление темпов роста населения относительно закона (1) с тенденцией к стабилизации его численности.

Именно применимость гиперболического закона на протяжении практически всей истории человека как вида представляется важнейшим обоснованием принципа демографического императива. Общий механизм роста не может быть обусловлен действием сравнительно недавно возникших факторов, связанных с экономикой или культурой.

Закону (1) соответствует автономное дифференциальное уравнение

$$\frac{dn}{dt}=\frac{n^2}{C}, \qquad (2)$$

которое само по себе косвенно подтверждает принципиальную возможность экстраполяции в прошлое, позволяя оценить условия и момент начала антропо-

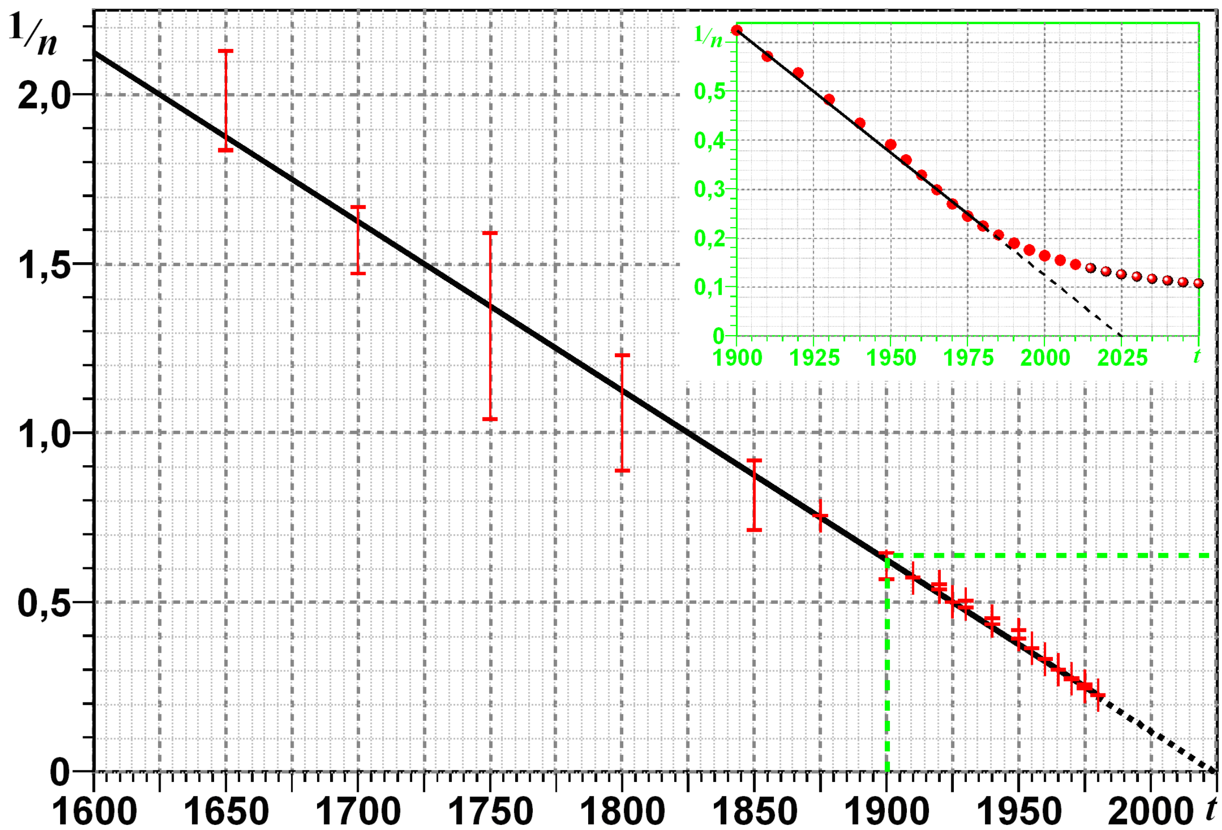


Рис. 3. Гиперболический рост

Данные по населению за 1650–1960 гг. даны с обратным представлением по оси ординат. Прямая в таких координатах соответствует формуле (1), а пересечение ее продолжения с осью абсцисс определяет момент обострения t_f.

На врезке приведены данные о численности человечества за XX век, дополненные прогнозом до 2050 г. Видно, что гиперболический закон становится неприменим даже приближенно.

По данным [3,4].

генеза. Это событие отмечено минимально возможным значением прироста населения, равным одному человеку за одно поколение. Приняв время смены поколений $\tau \approx 20$ *лет*, получаем исходную численность популяции

$$n_0 = \sqrt{1/\tau \cdot C} \approx 100\,\text{тыс.чел.} \qquad (3)$$

и момент начала роста

$$t_0 = C/n_0 \approx -2\,\text{млн лет},$$

находящиеся в удовлетворительном согласии с антропологическими данными [2].

Различные модели дают оценку предельной численности человечества на уровне $n_\infty \approx 10$ *млрд чел.* (см. далее). Таким образом, отношение n_∞ / n_0 достигает 5 порядков величины. Поэтому было бы ошибкой рассматривать правую часть уравнения (2) как кинетическую запись, связанную с частотой сексуальных контактов мужчин и женщин. Ведь тогда пришлось бы заключить, что за время, прошедшее с момента t_0, эта частота выросла пропорционально увеличению n.

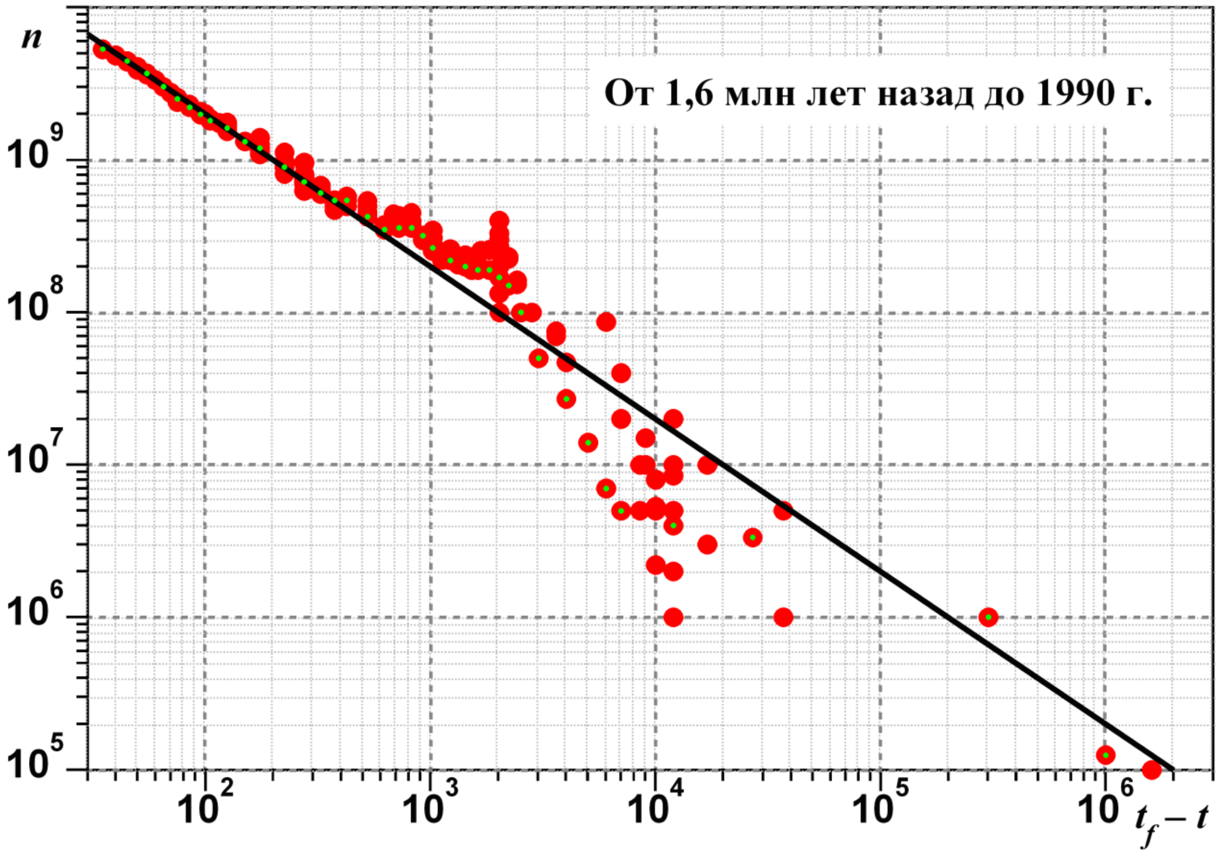


Рис. 4. Экстраполяция гиперболического закона в прошлое

Прямая соответствует формуле (1). Значительные отклонения точек от нее соответствуют ледниковому периоду (вниз) и римскому и средневековому климатическим оптимумам (вверх).

Наколотыми точками показаны данные из работы [3], образующие временной ряд.

Значения остальных точек взяты из источников [1,2,6,7] и, будучи получены разными методами, не допускают какой-либо обработки.

С.П. Капица, предложивший феноменологическую модель роста человечества [1,2], объяснял рост гипотетическим *информационным взаимодействием*, интенсивность которого пропорциональна числу парных отношений между людьми, что и приводит к квадратичному виду правой части уравнения (2).

К сожалению, такой подход имеет ряд неустранимых недостатков. С одной стороны, остается неясным, каким именно образом информационное взаимодействие между людьми приводит к росту их численности. А с другой – возникают трудности с объяснением явления демографического перехода, который трактуется как результат того, что прирост численности человечества за одно поколение становится сравнимым с числом уже живущих людей, из-за чего информационное взаимодействие не успевает подстраиваться под столь стремительные изменения. Однако, как легко понять, при этом рост населения, если он действительно обусловлен информационным взаимодействием, должен вовсе не прекратиться или замедлиться, а продолжаться с постоянной скоростью, ведь уже установившееся информационное взаимодействие никуда не исчезает.

В настоящей работе предлагается другой подход к построению глобальной демографической теории роста, основанный на представлении о жизнесберегающих технологиях и принципе технологического императива.

Математическая модель демографического роста

Компоненты естественного движения населения

Глобальная демография проще демографии стран и регионов, поскольку для мира в целом отсутствует внешняя миграция и его население меняется только за счет рождаемости и смертности.

Рассмотрим особенности этих компонент по отдельности.

Рождаемость

На заре антропогенеза процессы рождения и смерти людей в среднем уравновешивали друг друга. Но далее между рождаемостью и смертностью возник зазор, который до недавнего времени только увеличивался, обеспечивая ускоряющийся рост популяции. Принципиально, что зазор не мог возникнуть за счет увеличения рождаемости, так как ее уровень обыкновенно занижен по сравнению с предельными репродуктивными возможностями человека.

В процессе своего развития человечество выработало множество социокультурных *ограничителей рождаемости*: религиозную регламентацию сексуальных отношений, установление возраста совершеннолетия, необходимость дать приданное за невестой или уплатить за нее калым, многоженство, эмансипация женщин, сексуальная революция и т.п. Действие этих ограничителей позволяет избежать колебаний численности, вызванных эффектами запаздывания. Такие колебания наблюдаются в популяциях многих видов животных. Чрезмерное размножение в благоприятной обстановке приводит впоследствии к перенаселенности, обострению внутривидовой конкуренции и резкому подъему смертности. Люди способны демпфировать подобные колебания, не допуская слишком быстрого роста своей численности. И наоборот, если произошло резкое сокращение народонаселения, вызванное форс-мажорными обстоятельствами (стихийные бедствия, войны, эпидемии), его можно быстро восстановить, временно отбросив ограничения и подняв рождаемость до естественного уровня.

Таким образом, нет оснований полагать, что рождаемость может систематически увеличиваться. Поэтому мы будем считать ее уровень неизменным в фазе демографического роста и снижающимся во время демографического перехода.

Сформулированная качественная модель изменения рождаемости не вполне соответствует реальности, поскольку кроме социокультурных ограничителей рождаемости, возникавших по мере развития человечества, существуют так же ее биологические ограничители, по мере развития снимавшиеся. Снятие каждого их них происходило на сравнительно узком промежутке времени. Поскольку отдельный учет таких краткосрочных событий в модели, описывающий длительный процесс, нецелесообразен, мы будем формально интерпретировать действие биологических ограничителей как фактор смертности, а их снятие – как ее уменьшение. Такое усложнение интерпретации действия биологических ограничителей рождаемости позволяет получить более простое описание ее динамики.

Продемонстрируем применение этого подхода на примере двух основных биологических ограничителей рождаемости.

Снижение смертности женщин, ранее не позволявшей многим из них дожить до конца репродуктивного периода, имело следствием рост рождаемости. Однако нерожденных детей этих женщин можно формально считать всё же родившимися (после смерти матерей), но при этом умершими еще в момент зачатия (т.е. не потребив никаких ресурсов даже на внутриутробное развитие). Тогда уменьшение смертности женщин, находящихся в репродуктивном возрасте, будет сопровождаться уже не ростом рождаемости, а падением детской смертности, что, однако, никак не скажется на изменении численности населения.

Аналогичным образом будем трактовать и другую ситуацию восстановления биологически заниженной рождаемости, возникающую при переходе от кочевого образа жизни к оседлому. Женщины, вынужденные постоянно совершать дальние пешие переходы, в течение долгого срока выкармливая детей грудью, реже зачинают (лактация блокирует овуляцию). Соответственно, при переходе к оседлой жизни одновременно возрастают как рождаемость, так и детская смертность, которые формально можно считать одинаково высокими и (эффективно) неизменными.

Смертность

Исключение рождаемости из числа факторов, обуславливающих рост народонаселения, заставляет предположить, что он связан со снижением смертности. Нелинейный вид правой части уравнения (2) свидетельствует о том, что мы имеем дело с коллективным эффектом. И, в самом деле, выживать в одиночку обычно сложнее, чем в коллективе, члены которого могут помогать друг другу. Поэтому основным фактором, сокращающим смертность, является взаимопомощь, т.е. форма коллективного поведения, повышающая шансы на выживание каждой отдельной особи.

В популяциях животных коллективное поведение выражается в стайной охоте и миграции, совместной защите от хищников и заботе о потомстве. Для человека спектр форм взаимопомощи становится много шире, пополняясь передачей накопленного опыта от стариков к молодым, обменом товарами и знаниями, а также возможностью профессиональной специализации и разделения социальных функций членов популяции. Люди, в отличие от животных, не ограничены инстинктивными схемами коллективного поведения и вырабатывают гибкие формы взаимопомощи, эффективно использующие имеющуюся численность.

Рассмотрим для примера ситуацию встречи человека с крупным хищником. Если человек один, то он, скорее всего, просто будет съеден. Однако если людей десяток, то часть из них разбежится и уцелеет, в то время как сотня уже сумеет отбиться. Для тысячи человек не составит труда организовать охрану своего поселения, а для десяти тысяч – сформировать отряды для охоты на зверя. Сто тысяч человек изведут всех его собратьев в округе, а если и не всех, то, дойдя количеством до миллиона, переловят оставшихся для зоопарка… Иными словами, в зависимости от количества людей меняется их реакция на конкретную опасность и относительный уровень потерь от нее. Будь человек животным, описанная цепочка оборвалась бы где-то на десятке–сотне особей, а так ее легко можно продолжить и далее вплоть до борьбы за сохранение хищника как вымирающего вида.

В то время как формы коллективного поведения, доступные животным, предполагают конкретный перечень действий, для каждого из которых имеется оптимальный размер популяции, взаимопомощь людей тем эффективнее, чем их больше. В этом заключается принципиальное отличие человека от животных, которое можно рассматривать как *определение разума на уровне вида*. Единственная задача любого биологического вида – преумножать свою численность. Человек справляется с этой задачей качественно лучше животных именно потому, что разумен и способен расширять спектр видов взаимопомощи, адаптируя их к новым ситуациям и сокращая смертность по мере роста популяции.

Увеличение количества людей обусловлено тем, что остаются живы те, кто умер бы, не будь взаимопомощи. А рост народонаселения, в свою очередь, приводит к дальнейшему усилению ее роли и снижению смертности.

Концепция жизнесберегающих технологий

Высказанные выше соображения, дающие принципиальное объяснение феномена роста народонаселения, в неизменном виде не могут быть положены в основу демографической теории. Они применимы лишь для отдельной популяции и не допускают прямого обобщения на всё человечество, которое, будучи целостной системой, не сводимо к сумме отдельных популяций. Кроме того, начиная с определенного количества людей, их непосредственная взаимопомощь становится невозможной, т.к. человек способен участвовать лишь в ограниченном числе социальных связей.

Чтобы отдельные людские популяции могли составлять единое человечество, между ними должно быть какое-то взаимодействие. Однако человек сегодня, как и миллион лет назад, живет довольно обособленно, занимаясь преимущественно своими делами и уделяя мало внимания внешнему миру. Таким образом, искомое взаимодействие должно быть чрезвычайно мощным, чтобы не затухая преодолевать огромные пространства и людскую замкнутость. Это означает, что его «переносчик» должен очень легко перемещаться, не расходуясь при взаимодействии, свободно проникая сквозь географические, политические и культурные барьеры.

Необходимыми свойствами обладают только *технологии*, т.е. знания, которые, будучи однажды обретенными, уже не утрачиваются, так как их распространение и тиражирование дается намного легче, чем создание.

Термин «технологии» здесь понимается предельно широко и включает в себя не только способы хозяйствования, но и государственное управление, воинское искусство, религиозные доктрины, средства коммуникаций, торговлю, медицину и вообще любые знания и навыки, которые могут быть использованы для спасения человека от смерти или продления его жизни. Такие знания предлагается именовать *жизнесберегающими технологиями*.

Жизнесберегающие технологии имеют принципиальное отличие как от информации *вообще*, так и от технологий в узко-инженерном смысле этого слова. Любая информация постепенно теряется (ни люди, ни материальные носители не вечны), и выжить во времени могут только те знания, которые жизненно необходимы и потому постоянно используются и возобновляются. Касаясь всех и являясь делом каждого, жизнесберегающие технологии не требуют для своего создания и распространения какого-то специального механизма.

Прежде чем перейти к изложению теории глобального демографического процесса, опирающейся на представление о жизнесберегающих технологиях, необходимо высказать одно простое соображение. Учет деталей при рассмотрении любой задачи целесообразен лишь в той мере, в какой мы знаем фундаментальные закономерности. Соответственно, при поиске этих закономерностей от деталей можно и должно отрешиться.

Характеризуя популяцию единственно ее численностью n и не принимая во внимание ни различие людей по возрасту и полу, ни пространственную структуру их расселения, мы аналогично огрубленным образом будем описывать и жизнесберегающие технологии, считая, что уровень их развития может быть охарактеризован одним числом p. При этом мы не задаемся вопросом, как определить его значение на основе каких-либо данных об имеющихся технологиях.

Жизнесберегающие технологии создаются людьми в процессе их повседневной деятельности, осуществляемой на основе уже имеющихся технологий. Соответственно, для скорости их появления можно записать кинетическое уравнение

$$\frac{dp}{dt} \sim pn. \tag{4}$$

Следует предостеречь от суженной трактовки уравнения (4) как результата исключительно действия «изобретателей» – людей, составляющих определенную часть населения и специализирующихся на совершенствовании технологий. Профессиональная специализация сама по себе является жизнесберегающей технологией, развитие которой и выражается в изменении доли таких людей.

Аналогичным образом распространение новых технологий из активно развивающихся центров тоже следует рассматривать как жизнесберегающую технологию. Ее действие снимает необходимость повторно изобретать одно и то же в разных местах или дожидаться, пока местных жителей заменят носители передовых технологий, принеся их с собой.

Наконец, освоение новых территорий и расширение ареала обитания также является результатом технологического развития, позволяющим добраться до земель, которые ранее были непригодны для обитания, и выжить там.

Технологический императив

В дикой природе средняя численность любого вида животных определяется размером занимаемой им *экологической ниши*, т.е. тем количеством особей, выживание которых может **обеспечить** вмещающая вид территория.

Аналогичным образом численность человечества определяется размером созданной им *технологической ниши*, т.е. тем количеством людей, которые могут быть **востребованы** созданными ими технологиями:

$$n = f(p). \tag{5}$$

Данное утверждение, постулирующее первичность технологических факторов по отношению к демографическим, назовем *технологическим императивом*, по аналогии с демографическим императивом, постулировавшим первичность демографии по отношению к экономике, политике, культуре и т.п.

Запись формулы (5) в виде алгебраического, а не дифференциального уравнения означает, что при изменении размера ниши подстройка численности происходит очень быстро, поэтому можно считать, что между n и p имеется функциональная связь.

В нормальной ситуации количество людей, выживание которых жизнесберегающие технологии могут обеспечить, совпадает с тем количеством людей, которое необходимо для их функционирования.

Если в силу действия каких-либо возмущающих факторов имеющиеся технологии более не могут обеспечить выживания всех востребованных ими людей, то происходит отказ от наименее эффективных и наиболее трудоемких технологий, т.е. сокращение размера технологической ниши. В случае же, если обеспечивается выживание большего количества людей, чем может быть востребовано, то возникает ситуация демографического перегрева, которая разрешается посредством значительных исторических событий (войны, смуты, крестовые походы, массовая миграция и т.п.), приводящих число живущих людей в соответствие с размером технологической ниши.

Рассмотрим балансировку населения и технологий на примере функционирования аграрного общества в условиях меняющихся климатических условий, влияющих на урожайность и – через нее – на размер технологической ниши. Если условия ухудшаются, урожай, собираемый с наименее плодородных земель, становится недостаточным, чтобы оправдать их обработку. В результате неудобья перестают использоваться, за счет чего повышается общая эффективность крестьянского труда и компенсируются неблагоприятные изменения климата. Если же условия улучшаются, то сначала вводятся в сельхозоборот неудобья, требующие сравнительно больших усилий, а затем, когда необработанных земель не остается, появляются люди, прокормить которых возможно, но дела для которых нет. Однако по мере увеличения числа таких людей нарастает социальная нестабильность, в конце концов приводящая к событиям, сокращающим население или выбрасывающим его избыток вовне, вновь восстанавливая связь вида (5).

И структура технологий, и система расселения людей по своей природе иерархичны, а сами технологии и поселения масштабируемы в диапазоне нескольких порядков величины. Поэтому естественным представляется предположение, что в фазе роста ни одна из входящих в формулу (5) переменных не имеет характерных значений и, следовательно, функция $f(p)$ однородна, т.е.

$$n \sim p^{\gamma}. \qquad (6)$$

Дифференцирование формулы (6) с последующим исключением переменной p посредством формулы (4) приводит к квадратичной зависимости скорости роста от населения вида (2), ранее полученной на основе анализа демографических данных. Таким образом, данная зависимость оказывается обусловлена технологической природой роста.

Естественная шкала технологий

Система (4)–(6) инварианта относительно преобразований вида

$$p \to \mu p^{\nu}, \qquad (7)$$

допускающих большую свободу выбора *шкалы измерения* жизнесберегающих технологий. Можно подобрать такие значения параметров μ и ν этого преобразования, что система уравнений примет вид

$$\frac{dp}{dt} = \frac{pn}{C}, \tag{8}$$

$$n = Cp \tag{9}$$

с одним и тем же параметром C, который как коэффициент пропорциональности между технологиями и населением характеризует *емкость технологической ниши*. Этот коэффициент – тот же самый, что и в уравнении (2), в чем можно убедиться, продифференцировав формулу (9) и исключив из результата скорость роста технологического уровня при помощи уравнения (8).

Величины C и p имеют размерности соответственно трудозатрат и обратного времени: $[C]$ = *чел.·год* и $[p]$ = *год*$^{-1}$, что служит ясным намеком на физический смысл этих величин. Переписав формулу (8) в виде

$$d\ln p = \frac{ndt}{C},$$

мы видим, что C – количество человеко-лет, необходимое для увеличения технологического уровня в e раз в условиях постоянной людской численности. А исключив с помощью формулы (9) переменную n из закона роста населения (1), получаем закон роста технологий

$$p(t) = \frac{1}{t_f - t}, \tag{10}$$

позволяющий интерпретировать их уровень как обратную постоянную времени. Т.е. именно технологическое развитие определяет сжатие исторического времени, ускоряющегося по мере приближения к моменту обострения.

Такая трактовка величины p дает возможность корректно соотнести принципиально дискретный характер технологического развития с его непрерывным описанием, каковое может рассматриваться только как осреднение. Предположим, что развитие человечества застопорилось из-за того, что оно столкнулось с некоторым технологическим барьером высоты

$$\delta p = \varepsilon p,$$

для преодоления которого требуется совершить определенную новацию. Коэффициент ε здесь можно грубо оценить долями единицы, т.к. существенно меньший барьер не послужил бы причиной задержки в развитии, а существенно больший – не мог бы быть преодолен при данном его уровне. Для определения времени δt, уходящего на преодоление технологического барьера, воспользуемся уравнением,

$$\frac{dp}{dt} = p^2,$$

которое получается прямой подстановкой формулы (9) в уравнение (8). Полагая

$$\frac{\delta p}{\delta t} \cong \frac{dp}{dt},$$

с помощью закона (10) находим

$$\delta t \cong \frac{\delta p}{p^2} = \frac{\varepsilon}{p} = \varepsilon\left(t_f - t\right).$$

Таким образом, дискретность развития становится несущественной при его рассмотрении на временах, соизмеримых с $t_f - t$.

Заметим, что довольно бессмысленно пытаться установить конкретное значение коэффициента ε, поскольку кроме собственно случайной природы, его величина находится под воздействием противонаправленных факторов, вносящих дополнительную неопределенность. С одной стороны, одновременно может существовать много потенциальных путей развития, преодоление барьера на любом из которых будет результативно, что уменьшает ε. А с другой – действие разного рода факторов, связанных с климатическими флуктуациями, географическими особенностями или историческими событиями, может сокра-

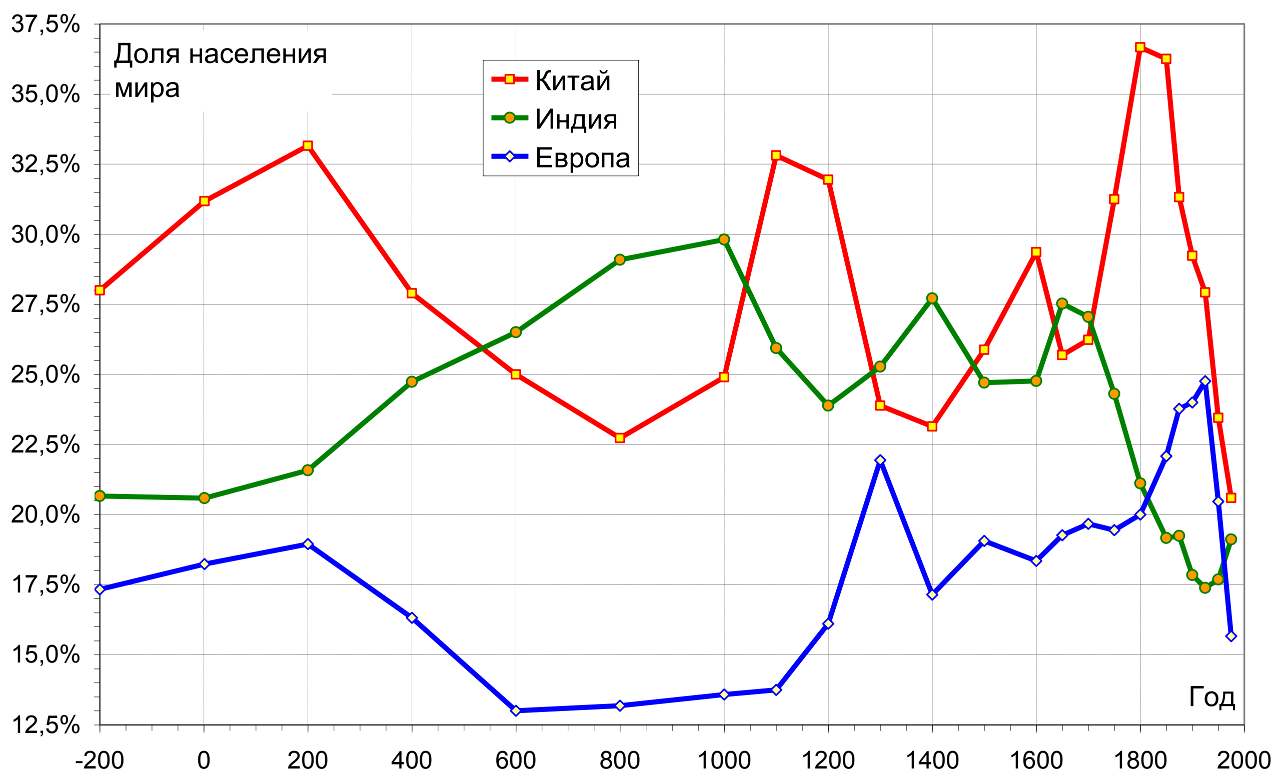


Рис. 5. Отношение населения некоторых регионов к общемировому населению

Хотя демографический вес крупнейших регионов подвержен значительным флуктуациям, его величина в фазе роста не демонстрирует выраженных долговременных тенденций.

По данным [3].

щать долю имеющихся технологий, эффективно доступных для преодоления барьера, что увеличивает ε.

Исключение из системы (8)–(9) не численности населения *n*, а константы *C* дает уравнение

$$\frac{dn}{dt} = p \cdot n, \tag{11}$$

объясняющее, почему гиперболический закон вида (1) оказывается, по крайней мере, приближенно применим к численности населения не только всего мира, но также отдельных регионов и даже стран. Если с некоторой точностью можно считать, что они характеризуются тем же самым технологическим уровнем, что и мир в целом, то для них скорость роста населения линейно зависит от его численности с одним и тем же коэффициентом (10). Более того, применимость закона вида (1) к частям мира сохраняется даже в том случае, если их технологический уровень составляет неизменную долю от общемирового, т.е. если они отстают в развитии, но отстают равномерно.

Как можно видеть из рис. 5, относительное количество людей, проживающих в крупнейших регионах мира, остается примерно постоянным на протяжении значительного времени. Поэтому динамика их населения должна быть, по крайней мере, качественно такой же, как и динамика всего человечества.

Пределы роста

Формула (11) может рассматриваться как уравнение мальтузианского роста с темпами

$$p = b - d,$$

где *b* и *d* – общие коэффициенты рождаемости и смертности. Считая в фазе роста рождаемость неизменной, можно записать

$$b = b_0 = d_0,$$

где нолик в нижнем индексе означает значения коэффициентов на момент начала роста, когда еще смертность уравновешивала рождаемость. Таким образом,

$$p = d - d_0, \tag{12}$$

т.е. уровень развития жизнесберегающих технологий равен достигнутому за их счет уменьшению коэффициента смертности. Иными словами, шкала, выбранная из соображений простоты уравнений, оказывается для жизнесберегающих технологий естественной. Вместо того чтобы пытаться учесть весь массив технологий и взаимосвязи между ними, мы измеряем уровень технологического развития по производимому эффекту, т.е. по доле людей, которых удается спасти от смерти в единицу времени.

Данный результат оправдывает предположение о возможности охарактеризовать различные аспекты технологического развития одним числом. Точно так же как в экономике фигурируют деньги как естественный скаляризатор, сводящий матрицу меновых стоимостей к вектору цен, так и в теоретической демографии фигурируют жизнесберегающие технологии как такой же естественный скаляризатор, сводящий все виды человеческой деятельности к количеству сохраненных жизней.

Формула (12) позволяет легко объяснить причины демографического перехода и оценить *пределы* технологического и демографического роста p_∞ и n_∞.

Величину коэффициента смертности первобытного человека можно оценить как $d_0 \approx 0{,}06$ *год*$^{-1}$ на основе кривой выживания шимпанзе, являющейся нашим ближайшим родственником среди ныне существующих видов [8].

Предельный коэффициент смертности можно ориентировочно оценить как $d_\infty \approx (0{,}01 \pm 0{,}01)$ *год*$^{-1}$, где базовое значение соответствует уровню, к которому эта величина приближается сейчас в наиболее развитых странах, а разброс буквально описывает диапазон от «от зверя до бога». Если бы при возникновении вида *Homo sapiens* максимальная продолжительность жизни наших предков осталась на обезьяньем уровне (примерно 50 *лет* [8]), а не увеличилась вдвое, то мы бы имели для погрешности знак «плюс», а если люди когда-нибудь станут бессмертными, как боги, то мы возьмем для нее знак «минус».

Таким образом, предел развития жизнесберегающих технологий есть $p_\infty = d_0 - d_\infty \approx (0{,}05 \pm 0{,}01)$ *год*$^{-1}$. Его наличие ни в коем случае не ограничивает возможности технологического развития *вообще*. Однако создаваемые технологии становятся всё менее эффективными с точки зрения спасения жизней. Тем самым они вносят всё меньший вклад (по отношению, скажем, к их экономической значимости или инженерной сложности) в величину p.

Как следует из формулы (9), предельная численность человечества составляет $n_\infty = Cp_\infty \approx (10 \pm 2)$ *млрд чел.* Особо подчеркнем, что конкретное значение и даже само существование этой величины никак не связано с какими бы то ни было ограничениями материального плана, а обусловлено исключительно природой демографического процесса. Человек биологически не способен развить жизнесберегающие технологии, которые востребовали бы большее количество представителей вида. К исчерпанию близятся не запасы полезных ископаемых, жизненного пространства или неосвоенных рынков, а возможности снижения смертности, т.е. тот ресурс, освоение которого и обеспечивало прогресс цивилизации.

Феноменологическая модель демографического перехода

Мы знаем, почему растет население, и знаем, как оно растет. Мы знаем, почему прекращается рост, но не знаем, как именно это происходит.

К сожалению, пока не сформулированы те первые принципы, из которых можно было бы строго вывести формулы, описывающие демографический переход. Поэтому вместо построения математической модели этого явления можно попытаться предложить только феноменологическую модель, т.е. угадать ключевые факторы, которые надо включить в нее во что бы то ни стало, и выписать для них из общих соображений такие формулы, которые бы обеспечили согласие с реальностью. При этом мы будем руководствоваться *принципами соответствия* и *простоты*, т.е. новая модель должна переходить в старую в фазе демографического роста и привлекать минимальное количество дополнительных параметров для описания фазы демографического перехода.

Построение модели

Ключевыми обстоятельствами, отражение которых абсолютно необходимо, представляются наличие естественного предела технологического развития и изменение возрастной структуры населения в результате снижения смертности.

Для учета первого из указанных факторов мы модифицируем уравнение (8), записав его в следующем виде

$$\frac{dp}{dt} = \frac{pn}{C} \cdot \left(1 - \frac{p}{p_\infty}\right). \qquad (13)$$

Такая запись не использует дополнительных параметров, т.е. является простейшей, обеспечивающей ограниченность технологического роста.

Кроме принципа простоты, нет никаких причин, почему в формуле (13) нельзя было бы, скажем, возвести скобку или, тем более, вычитаемое в ней в некоторую степень (напомним, что изначально технологический уровень был определен с точностью до произвольного преобразования вида (7), так что возведение его величины в степень представляется вполне естественной операцией). Однако удовлетворительное совпадение поведения модели с демографическими данными делает подобные усложнения излишними.

Второй из названных выше факторов сказывается на зависимости размера технологической ниши от уровня технологий. В результате формула (9) получает дополнительный множитель

$$n = Cp \cdot g(p), \qquad (14)$$

где функция $g(p)$ имеет вид S-образной кривой, плавно изменяющей свое значение от одного константного уровня до другого. Тем самым учитывается переход от *треугольной возрастной пирамиды* к *прямоугольной*.

Треугольная возрастная пирамида обусловлена высокой смертностью во всех возрастах, в т.ч. в молодых, из-за чего с возрастом быстро сокращается доля доживших до него людей. По мере снижения смертности действие ее причин отодвигается к старшим возрастам, в силу чего доля людей, переживших детство, юность и даже зрелось, приближается к единице, а почти все смерти приходятся на старость, что и выражается в прямоугольном виде возрастной пирамиды.

Уровень жизнесберегающих технологий равен изменению общего коэффициента смертности, достигнутому в результате их развития, поэтому его значение для конкретного интервала возрастов (детства и юности) можно приблизить линейной функцией p, коэффициенты которой для простоты будем считать постоянными. Тогда вероятность пережить этот интервал возрастов (и дожить до зрелости) будет зависеть от p экспоненциальным образом. При этом изменение числа выживших приближенно описывается дробно-линейной функцией этой вероятности вида

$$g(p) = 1 + \frac{a}{1 + e^{-\alpha(p/p_\infty - \beta)}}, \tag{15}$$

имеющей три параметра, что является очевидным минимумом, т.к. при описании любого перехода необходимо указать, *когда*, *как быстро* и *как сильно* происходит изменение. Вновь обращаясь к принципу простоты, мы считаем переход симметричным, чтобы не вводить дополнительных параметров для описания его асимметрии.

Как можно видеть из табл. 1, где приведены параметры модели, $\alpha >> 1$. Из-за этого экспонента в формуле (15) пробегает практически всю положительную полуось. Поэтому при $p \to p_\infty$ можно считать $g(p) \approx 1 + a$, в результате чего система (13)–(14)–(15) упрощается до одного уравнения

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n^2}{C} \cdot \left(1 - \frac{n}{n_\infty}\right),$$

где $n_\infty = Cp_\infty \cdot (1+a)$. Неявное решение этого уравнения находится аналитически

$$\frac{n_\infty}{n(t)} + \ln\left(\frac{n_\infty}{n(t)} - 1\right) = 1 + \frac{t_f - t}{\tau},$$

что дает экспоненциальный асимптотический режим при $n \to n_\infty$

$$n_\infty - n(t) \cong n_\infty e^{n_\infty (t_f - t)/C}, \tag{16}$$

с характерным временем C / n_∞.

Таблица 1. Параметры моделей демографических роста и перехода

Величина	Рост	Переход	Единицы
C	200	199,1	*млрд чел.·год*
n_∞	10	10,26	*млрд чел.*
p_∞	0,05	0,0309	*год*$^{-1}$
n_∞/C		0,0515	
a	—	0,668	
α	—	19,54	
β	—	0,375	
t_f	2025	2006	г.

Альтернативные модели

Ранее различными авторами уже предпринимались несколько попыток построить феноменологические модели демографического перехода. Наиболее известны среди них модели Капицы [1,2] и Коротаева–Малкова–Халтуриной (КМХ) [9], которые мы тоже опишем и кратко проанализируем до сопоставления результатов с реальностью.

Чтобы поставить все модели в одинаковые условия, для моделей Капицы и КМХ проводилась такая же подгонка (методика описана далее) к демографическим данным, что и для предлагаемой в настоящей работе модели, а параметры и графики приводятся для этих моделей в двух вариантах – авторском и полученном в результате подгонки.

Модель Капицы

С.П. Капица предложил следующую феноменологическую зависимость скорости роста населения от его численности

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_\infty}{\tau} \cdot \frac{1}{\pi} \sin^2 \pi \frac{n}{n_\infty}, \tag{17}$$

переходящую в уравнение (2) при $n << n_\infty = \pi C/\tau$. Решение уравнения (17) может быть выписано явным образом и имеет вид

$$n(t) = \frac{n_\infty}{\pi} \operatorname{arcctg} \frac{t_f - t}{\tau}.$$

При $n << n_\infty$ оно превращается в закон роста (1), а асимптотическое поведение решения при $n \to n_\infty$ дается аналогичной безмасштабной формулой

$$n_\infty - n(t) \cong \frac{C}{t - t_f}. \tag{18}$$

Параметры модели представлены в табл. 2.

Модель КМХ

А.В. Коротаев, А.С. Малков и Д.А. Халтурина предложили модель, сводящуюся к системе уравнений

$$\begin{cases} \dfrac{dn}{dt} = n \cdot s \cdot \left(1 - \left(n/n_\infty\right)^z\right) \\ \dfrac{ds}{dt} = \dfrac{s}{\tau} \cdot n/n_\infty \end{cases},$$

где переменная s характеризует экономическое развитие в условных единицах, τ – некоторая постоянная времени, z – нетривиальный показатель, а природа предельной численности n_∞ связывается авторами с достижением населением 100%-грамотности. Параметры модели приведены в табл. 3.

Эта система может быть решена в квадратурах делением первого ее уравнения на второе:

$$\tau \cdot ds = \frac{d\, n/n_\infty}{1-(n/n_\infty)^z}\,.$$

И хотя данное уравнение не интегрируется в элементарных функциях, легко находятся решения для предельных случаев.

При $n \ll n_\infty$ величины s и n связаны просто линейной зависимостью

$$n = n_{\min} + n_\infty \tau s\,,$$

где $n_{\min}$ – численность населения при нулевом экономическом развитии.

Подстановка этой формулы в первое уравнение системы показывает, что в пределе малой численности она переходит в уравнение (2) только при специальном подборе параметров (при $n_{\min} = 0$). Нарушение моделью КМХ принципа соответствия приводит к тому, что она де факто трактует демографический рост как пороговый эффект. Темп прироста населения, примерно равный s, при $n < n_{\min}$ должен был бы быть отрицательным в силу отрицательности s.

Примечательно, что если бы реальный рост населения не отклонялся от закона (1), население достигло бы численности $n_{\min}$ еще в середине VI или начале VII вв. при авторских и подобранных параметрах соответственно. Реально же эта численность была достигнута чуть раньше – в конце старой эры. Из того, что $n_{\min}$ превышает n_0 более чем на 3 порядка (см. табл. 3 и формулу (3)), можно заключить, что модель КМХ способна описывать лишь ничтожную долю протяженности демографического процесса.

В другом пределе – при $n \to n_\infty$ – решение системы тоже может получено в элементарных функциях и подчиняется формуле

$$n_\infty - n(t) \sim e^{-e^{-\frac{t-t^*}{\tau}}}\,, \qquad (19)$$

означающей столь стремительное приближение населения к асимптотическому пределу, что в численных рас-

Таблица 2. Параметры модели Капицы

Величина	Автор	Подгонка	Единицы
n_∞	12,92	12,26	*млрд чел.*
τ	45,00	43,25	*год*
t_f	2005	2000	г.

Таблица 3. Параметры модели КМХ

Величина	Авторы	Подгонка	Единицы
n_∞	8,5	9,5	*млрд чел.*
z	0,755	0,68	
τ	18,1	17,5	*год*
t^*	1998,9	2013,7	г.
$s(t^*)$	8,78%	10,0%	*год*$^{-1}$
$n_{\min}$	142	128	*млн чел.*

четах выход на константу можно считать происходящим за конечное время (и случиться это должно еще в первой половине XXI века, что представляется абсолютно нереалистичным). При этом s продолжает экспоненциальный рост с характерным временем τ, т.е. экономическое развитие не прекращается после остановки демографического роста, что означает принципиальное отличие величины s от уровня жизнесберегающих технологий p.

Подбор параметров и сравнение моделей

Для подбора параметров моделей рассматривается зависимость темпа прироста населения от его численности. Использовать в качестве аргумента дату было бы нецелесообразно из-за временно́й неравномерности демографического процесса. А выбор в качестве зависимой переменной именно темпа прироста связан с тем, что эта величина характеризуется наименьшим диапазоном изменения (имеющиеся данные укладываются менее чем в два порядка), что максимально уравнивает значимость разных участков графика. Кроме того, данная пара величин выгодно отличается от всех прочих пониженной чувствительностью к разного рода флуктуациям, которыми изобилует фаза роста (изменения климата, войны, эпидемии, переселения народов). Поскольку в это время темп прироста был приблизительно пропорционален населению, такие воздействия сдвигают точки вдоль графика, в минимальной степени нарушая его вид.

Учитывая, что результаты подгонки многопараметрических моделей могут быть весьма чувствительны к используемому эталону, подробно опишем методику его получения.

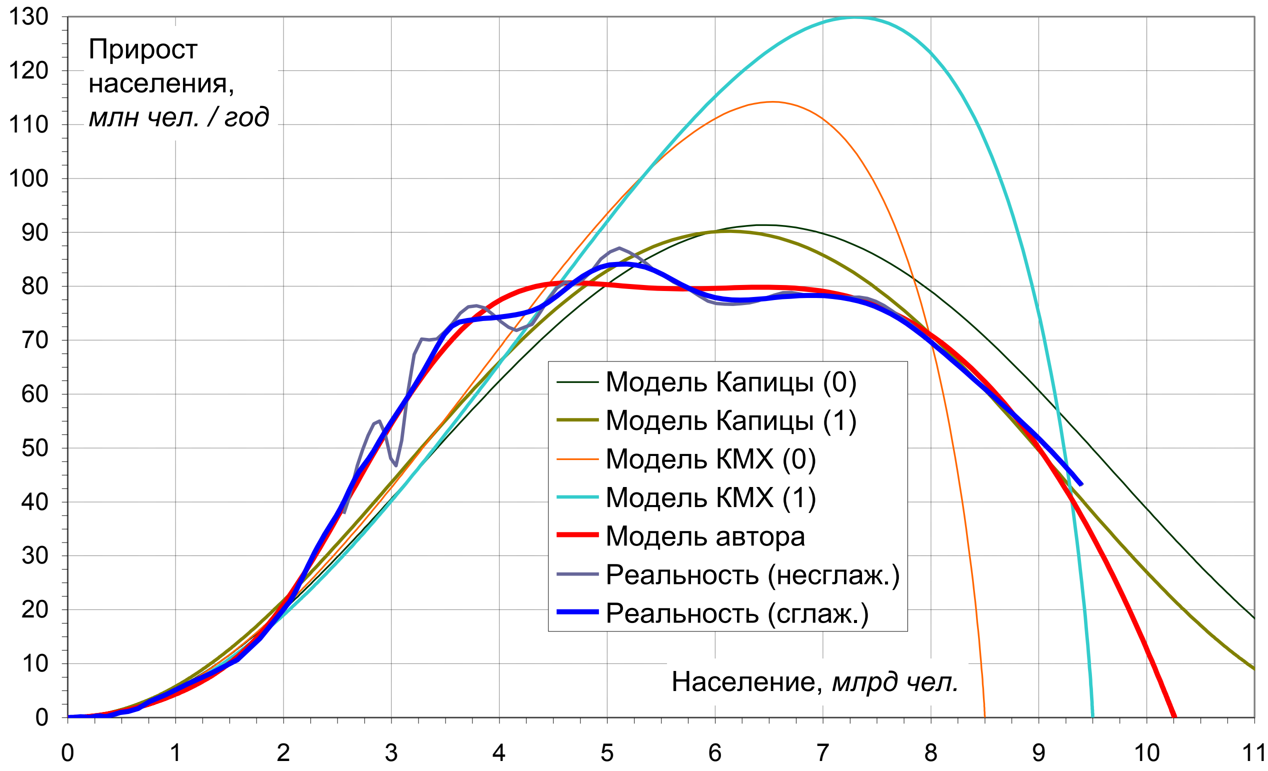
Сколь-либо подборные демографические данные по всему миру до середины XX века отсутствуют. Поэтому для построения реальной зависимости темпов от населения использовался временной ряд его численности, взятый из работы [3]. В связи с тем, что точки здесь весьма редки, а диапазон изменения величин и их погрешности чрезвычайно велики, использовался следующий метод фильтрации. Рассматривалась зависимость населения от времени до момента обострения в двойных логарифмических координатах

$$\ln n(t) = h\left(\ln\left(t_f - t\right)\right),$$

аналогичная показанной на рис. 4 на стр. 7. Дифференцирование этой зависимости выражает темп прироста населения через ее локальный наклон

$$\frac{1}{n}\frac{dn}{dt} = h'\left(\ln\left(t_f - t\right)\right)\frac{1}{t - t_f},$$

который определялся с помощью линейной регрессии по 5 точкам. Соответствующие значения n и $t_f - t$ рассчитывались усреднением логарифма по тем же точкам и потенциированием результата.



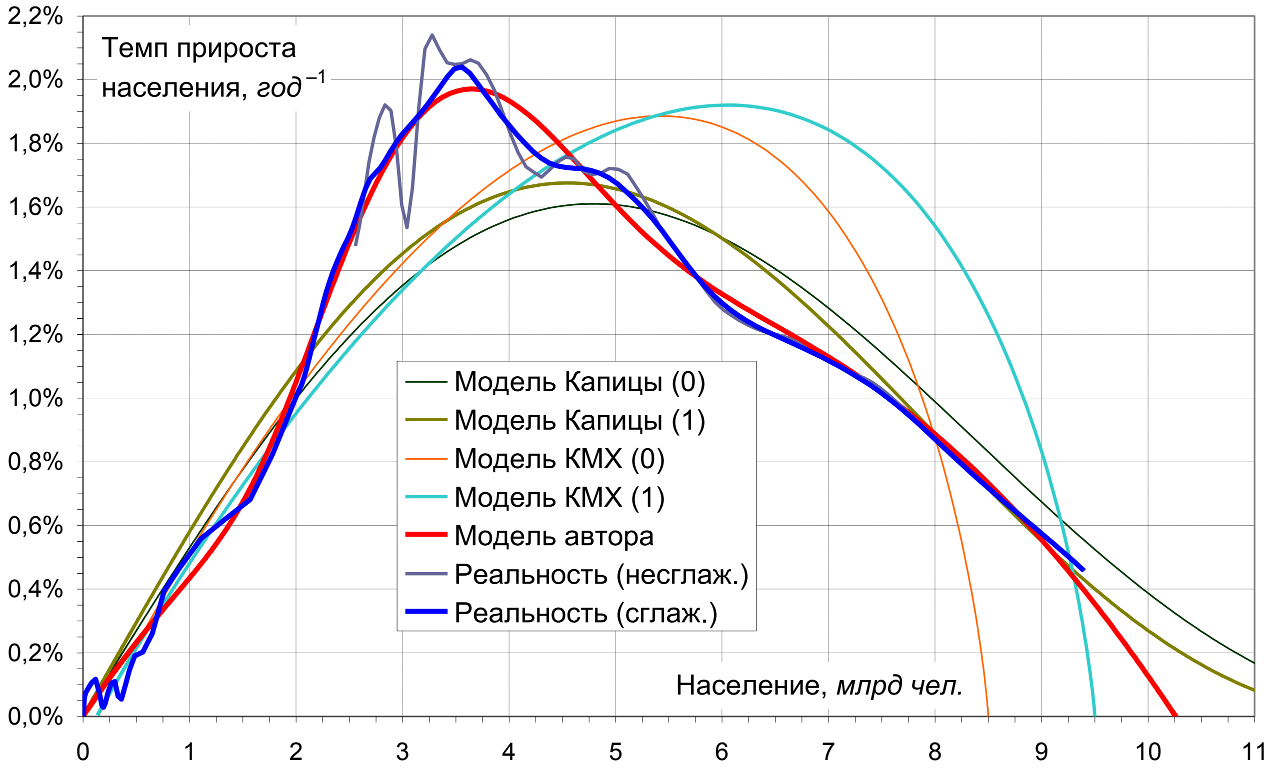


Рис. 6. Сравнение фазовых портретов моделей

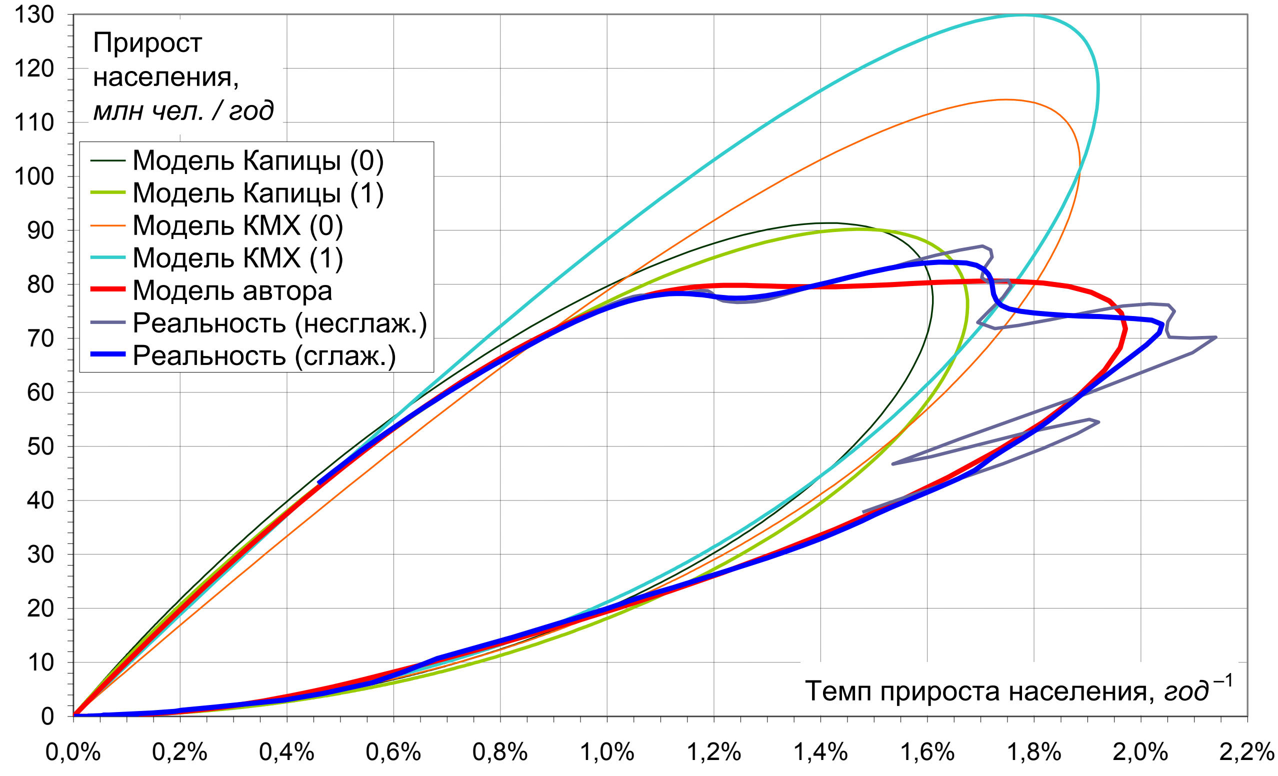
Ни одна из классических моделей не может приблизить реальные графики прироста и его темпов, тогда как соответствие динамики авторской модели демографическим данным следует признать удовлетворительным.

Нолики в названиях моделей означают использование параметров, предложенных их авторами, а единички – параметров, обеспечивающих наилучшее приближение графика темпов.

Начиная с середины XX века появляется подробная демографическая статистика. В настоящей работе использовались данные Бюро переписи населения США [4], дающие ежегодные данные о мировом населении и прогноз его динамики на интервале 1950-2050 гг. Темп прироста определялся как логарифмическая производная численности, рассчитанная на 15-летних промежутках (угловой коэффициент регрессионной прямой, приближающей зависимость логарифма населения от времени), а в качестве численности населения просто берется ее величина из середины промежутка.

Для справки (т.е. без использования для определения параметров модели) на рис. 6 показан результат аналогичной обработки данных по 5-летним промежуткам, демонстрирующий масштаб флуктуаций темпов, имевших место даже во второй половине XX века. Расхождение между этими – сглаженной и несглаженной – зависимостями дает представление о тех требованиях по точности, которые следует предъявлять к модели. Ее предсказания можно считать удовлетворительными, если они отклоняются от реальных данных менее чем разные усреднения друг от друга.

Кроме того, от фазовых портретов моделей следует ожидать воспроизведения ключевых особенностей демографической реальности, среди которых



9

Рис. 7. Сравнение динамических портретов моделей

Обход петли против часовой стрелки соответствует движению из прошлого в будущее.

В реальности прирост населения долгое время может оставаться практически постоянным на фоне падения темпов за счет быстрого увеличения его величины. Эта особенность поведения воспроизводится моделью автора, тогда как классические модели предполагают синхронное переключение прироста и его темпов с возрастания на убывание.

наиболее важными представляются практическое постоянство среднегодового прироста населения на широком диапазоне его значений, прохождение которого увеличивает человечество примерно на 4 *млрд чел*., и отчетливо выраженный максимум зависимости темпов прироста населения от его численности, достигаемый при еще сравнительно небольшом ее значении в 3,5 *млрд чел*.

Рис. 6 демонстрирует разительные качественное и количественное отличия моделей Капицы и КМХ как от реальности, так и от предложенной модели, заставляющие отдать предпочтение последней.

Так же обращает на себя внимание принципиально разный вид графиков в правых частях рис. 6, которые для модели Капицы подходят к оси ординат горизонтально, для модели КМХ – вертикально, а для предлагаемой модели – под некоторым нетривиальным углом. В ней население приближается к асимптотическому пределу n_∞ с характерным временем, которое имеет конечное значение (формула (16)), тогда как в модели Капицы оно бесконечное (формула (18)), а в модели КМХ эффективно нулевое (формула (19)). С этой точки зрения поведение классических моделей следует счесть вырожденным.

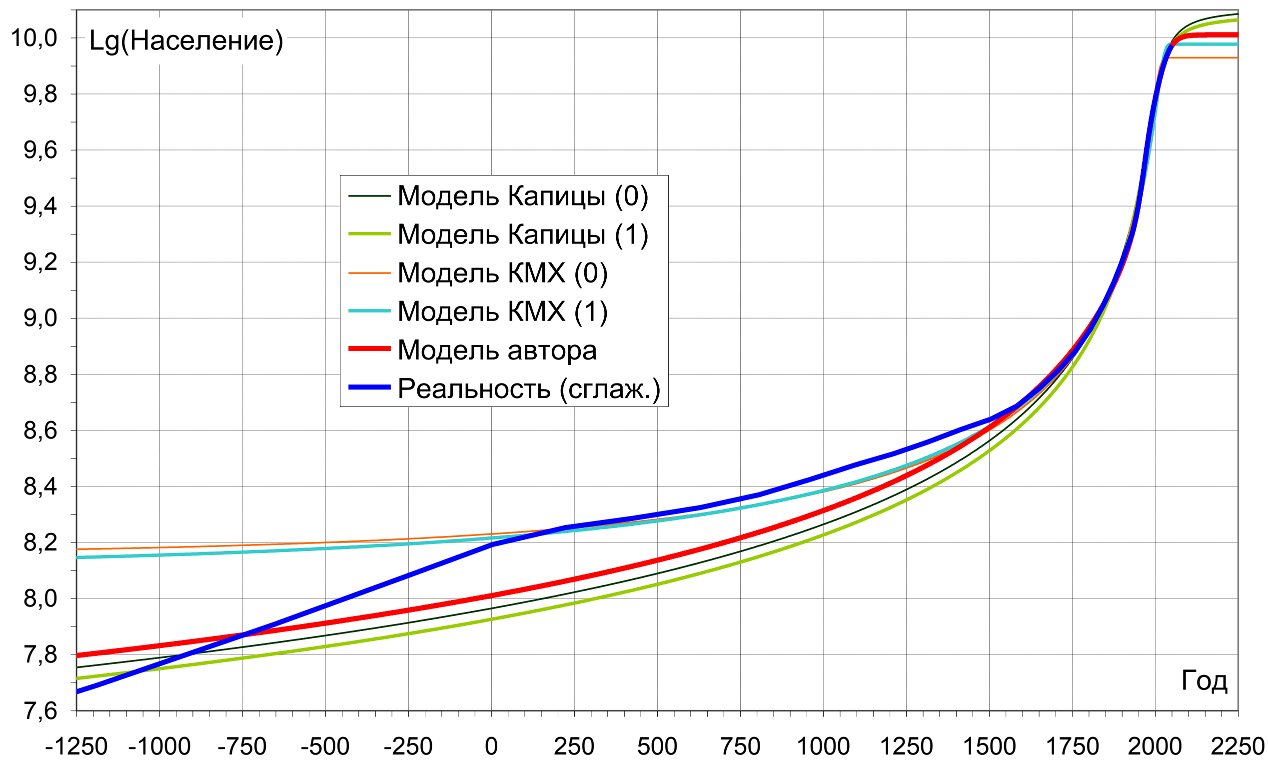


Рис. 8. Сравнение динамики населения на больших временах

Все рассмотренные модели для XIX–XX вв. обеспечивают удовлетворительное приближение реальных данных. А модель КМХ согласуется с ними на протяжении всей новой эры, включая римский (I–IV вв.) и средневековый (X–XIII вв.) климатические оптимумы, девиантный характер численности населения во время которых отчетливо виден на рис. 4.

Модели С.П. Капицы и автора не обладают способностью так хорошо воспроизводить последствия климатических флуктуаций, давая сильно заниженные значения численности во время климатических оптимумов, но лучше отслеживая общий тренд.

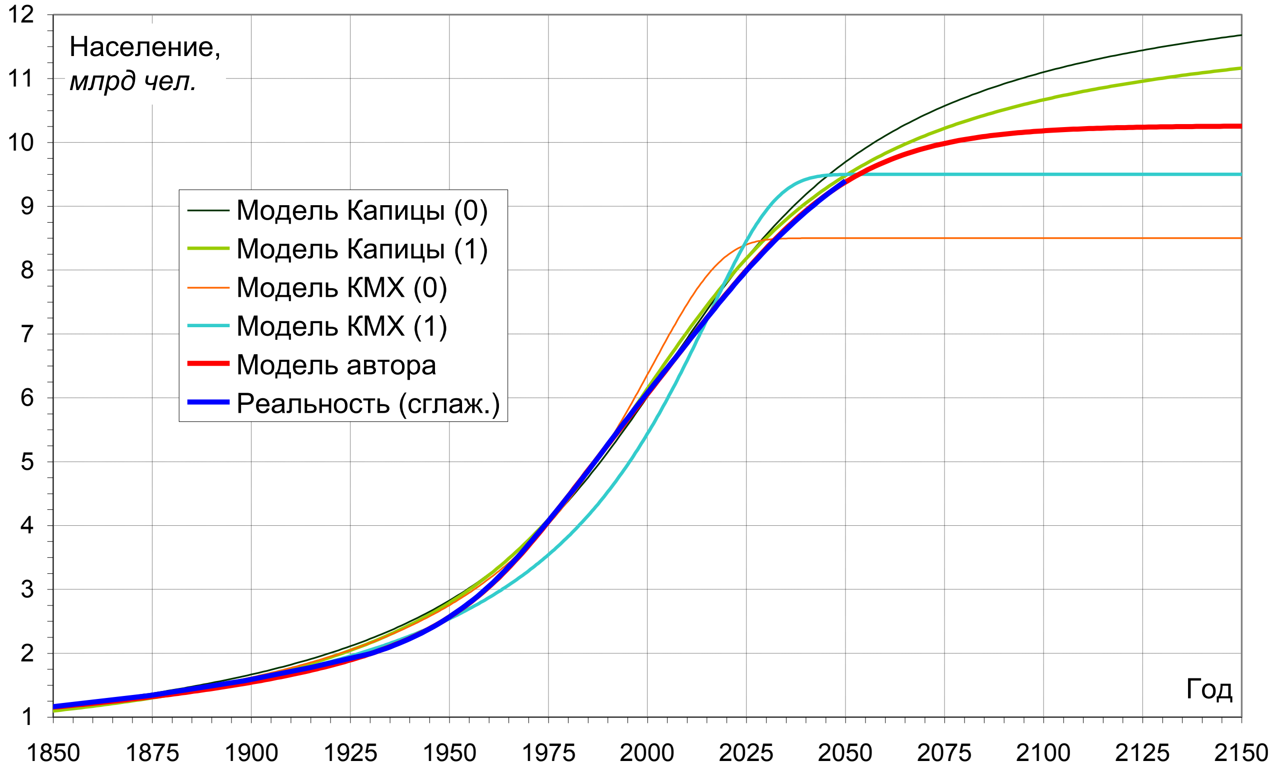


Рис. 9. Сравнение динамики населения на малых временах

Чтобы успеть выйти на константу за конечное время, населению в модели КМХ приходится заранее расти слишком быстро, что приводит к заметным отличиям предсказаний этой модели от реальности.

Как и на рис. 8, модели Капицы и автора лучше описывают динамику населения.

Проблемы этих моделей, возникающие при $n \to n_\infty$, можно замаскировать, если исключить из рассмотрения численность населения, перейдя от фазовых портретов к динамическому, как это сделано на рис. 7. Тем не менее, даже при таком подходе остаются качественные различия между реальностью и авторской моделью, с одной стороны, и классическими моделями, с другой.

Отчасти реабилитирует модели Капицы и КМХ рис. 8, демонстрирующий зависимость населения от времени на масштабе 3,5 *тыс.лет*. На большей части этого графика флуктуации сильнее сказываются на населении, чем его естественный рост, а на той меньшей части, где флуктуации уже несущественны, рост столь значителен, что его особенности практически неразличимы.

Чтобы различить особенности популяционной динамики во время демографического перехода по результатам разных моделей, ограничимся масштабом 3 веков, как сделано на рис. 9. При этом преимущество предложенной модели вновь становится заметным.

Анализ свойств модели демографического перехода

Табл. 1 на стр. 19 содержит значения параметров модели (13)–(14)–(15), полученные подгонкой предсказаний модели к зависимости темпов роста от численности населения, в сравнении с параметрами модели (8)–(9). Как можно видеть, величины n_∞, C, и их отношение, значение которого описывает предельное уменьшение коэффициента смертности, не претерпели заметных изменений, тогда как величина p_∞ ощутимо уменьшилась.

Это связано с возрастающим характером функции (15), означающим увеличение емкости технологической ниши во время демографического перехода, что составляет суть этого явления с точки зрения технологического императива. Изменение возрастной структуры приводит не к уменьшению числа востребованных технологиями людей за счет возрастания доли взрослых, как можно было бы ожидать, а к возможности для «лишних» взрослых найти себе место в технологической нише. Раньше таких людей в популяции просто не могло появиться, поэтому не существует и механизмов их исключения или недопущения их появления, хотя весьма вероятно возникновение таких механизмов в будущем. В этом случае сценарий стабилизации численности человечества сменится сценарием ее убывания, что потребует доработки модели, для чего, однако, пока нет наблюдательных данных по миру в целом, а демографическая динамика отдельных стран искажается процессами миграции.

Среди новых безразмерных параметров два, описывающие масштаб (a) и момент перехода (β), предсказуемо даются долями единицы, тогда как третий,

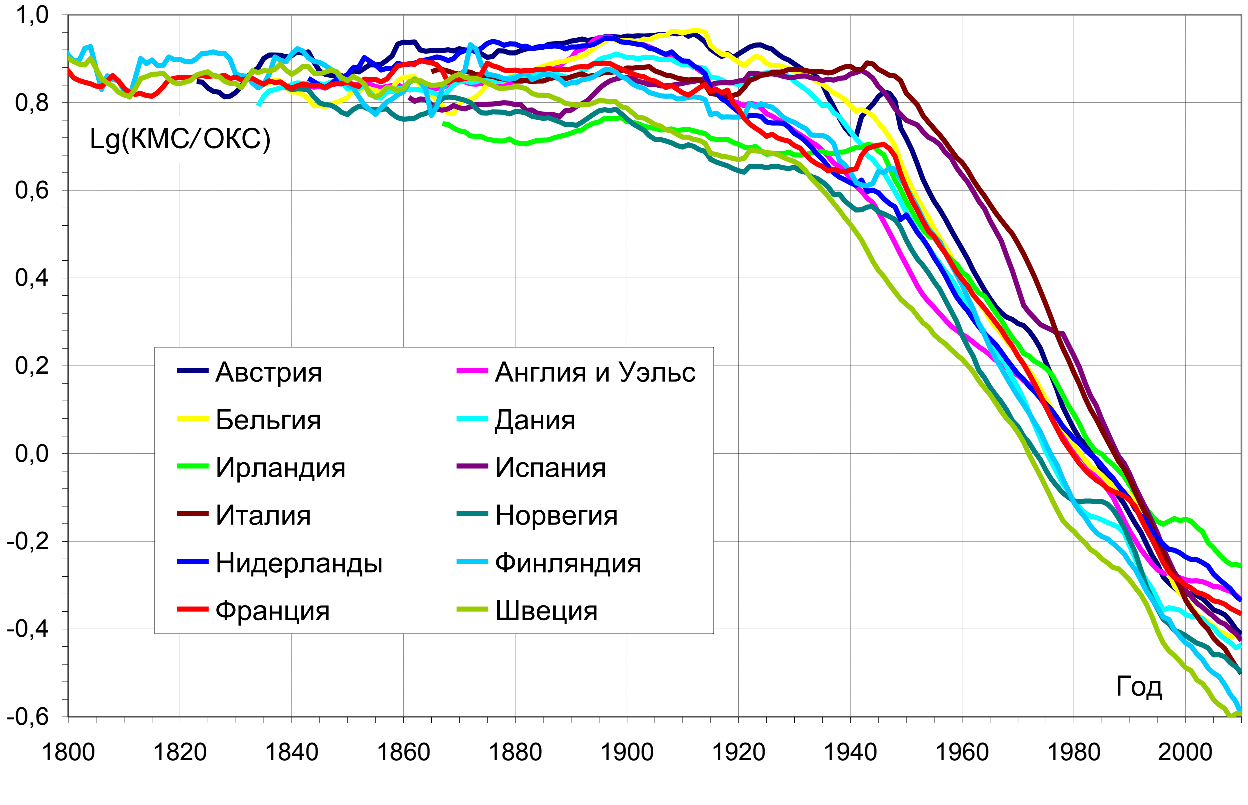


Рис. 10. Изменение возрастной структуры смертности

Коэффициент младенческой смертности падает быстрее общего коэффициента смертности. На интервале времени, для которого имеются данные, отношение младенческой смертности к общей меняется примерно от 8:1 до 2:5, т.е. в 20 раз.

По данным [10].

характеризующий его скорость (α), оказывается большим и, как любой большой параметр, требует объяснения.

На рис. 10 показана динамика отношения коэффициента младенческой смертности (КМС) к общему коэффициенту смертности (ОКС) для европейских стран, по которым имеются длинные ряды данных. Как можно видеть, уменьшение этого отношения соизмеримо со значением параметра α, что служит косвенным подтверждением разумности тех наводящих соображений, которые использовались при конструировании формулы (15). На длительный процесс ускоряющегося, а затем замедляющегося роста технологического уровня накладывается ограниченный во времени процесс перестройки возрастной структуры, результатом чего оказывается сложная демографическая динамика.

В формулах (13) и (15) фигурирует отношение p / p_∞, изменяющееся от 0 до 1 и служащее мерой *прогресса технологий*. Однако технологический уровень не доступен прямому измерению, поэтому наряду с этой величиной при изучении поведения модели используется и *прогресс населения* (n / n_∞). Соотношение между этими двумя величинами показано на рис. 11. Несмотря на то, что возрастающая функция $g(p)$ входит множителем в формулу размера технологической ниши (14), прогресс населения отстает от прогресса технологий, поскольку, очевидно, максимального значения этот множитель достигает в самом конце, сильнее увеличивая n_∞, чем n.

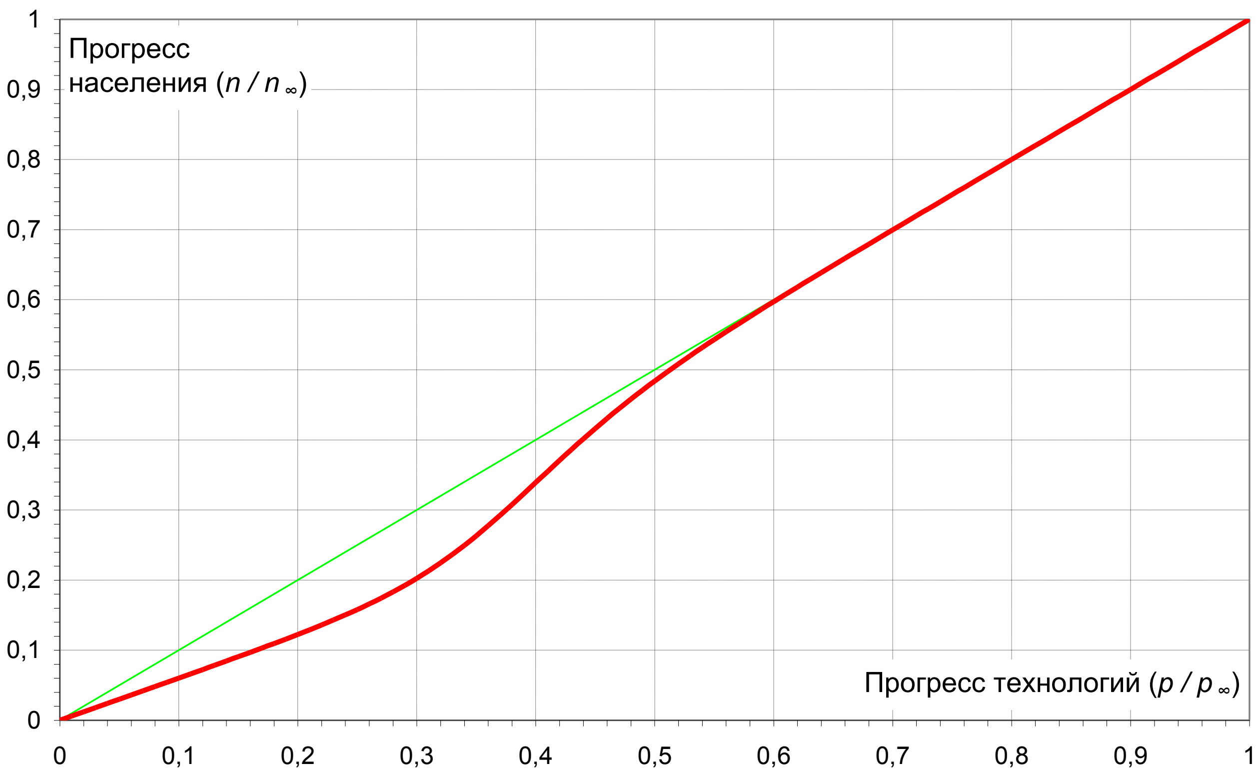


Рис. 11. Технологический и демографический прогресс

Технологии быстрее приближаются к своему пределу, чем население, в силу чего график лежит ниже биссектрисы первой четверти.

Этот и последующие графики рассчитаны для значений параметров из табл. 1.

Описываемое моделью изменение среднегодового прироста и его темпов по мере прогресса, показаны на рис. 12 на стр. 30. Прямая пропорциональность между прогрессом и темпами, имеющая место примерно до середины XIX в., впоследствии сменяется тоже примерно линейной зависимостью, но уже более крутой, и не проходящей через начало координат.

Квадратичная зависимость среднегодового прироста от прогресса на его начальном этапе оказывается медленнее линейной, из-за чего прирост достигает максимума позже темпов, но зато удерживается вблизи него намного дольше.

Переход от линейной формулы (9) к нелинейной (14) размывает физический смысл величины C. Она более не может однозначно интерпретироваться как постоянная емкость технологической ниши. Вместо нее можно ввести две *функции емкости* – интегральной и дифференциальной:

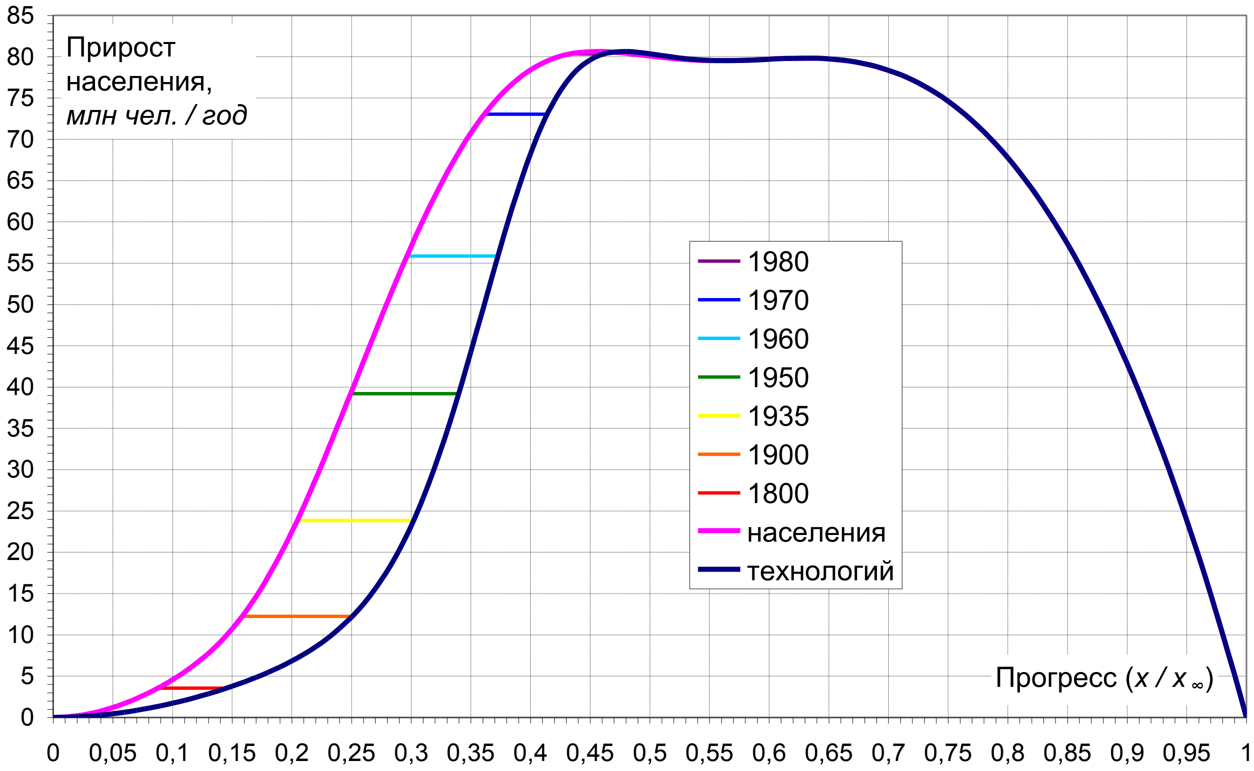
$$C_{\text{int}}(p) = \frac{n}{p} = C \cdot g(p)$$
$$C_{\text{diff}}(p) = \frac{dn}{dp} = C \cdot \left[g(p) + pg'(p)\right],$$

графики которых представлены на рис. 13 на стр. 31 в единицах C. Обе этих функции по ходу прогресса изменяются от C до $C(1+a)$. Однако если интегральная емкость описывает монотонное увеличения размера технологической ниши, то дифференциальная показывает, как и когда происходила перестройка возрастной структуры населения.

Кроме значения t_f (см. табл. 1) для предлагаемой модели имеется еще несколько характерных дат, которые можно было бы использовать для привязки процесса по времени. Перегиб графика $C_{\text{int}}(p)$ приходится на 1961 г., максимум функции $C_{\text{diff}}(p)$ – на 1967 г., максимум темпов прироста населения – на 1969 г., а максимум годового прироста населения – примерно на 1983 г. Впрочем, последняя дата весьма неустойчива, т.к. зависимость прироста от населения имеет длинный почти горизонтальный участок (см. рис. 12).

Выводы

Рост народонаселения обусловлен расширением технологической ниши человечества вследствие развития им жизнесберегающих технологий. Их мерой служит достигнутое за счет их действия сокращение коэффициента смертности. Его приближение к естественным пределам ограничивает возможности дальнейшего увеличения людской численности, а тем самым и того способа развития, который человек практиковал с момента своего выхода из животного мира. История, какой мы ее знаем, близится к концу, что грозит стать самым жестоким кризисом, с которым сталкивалась цивилизация.



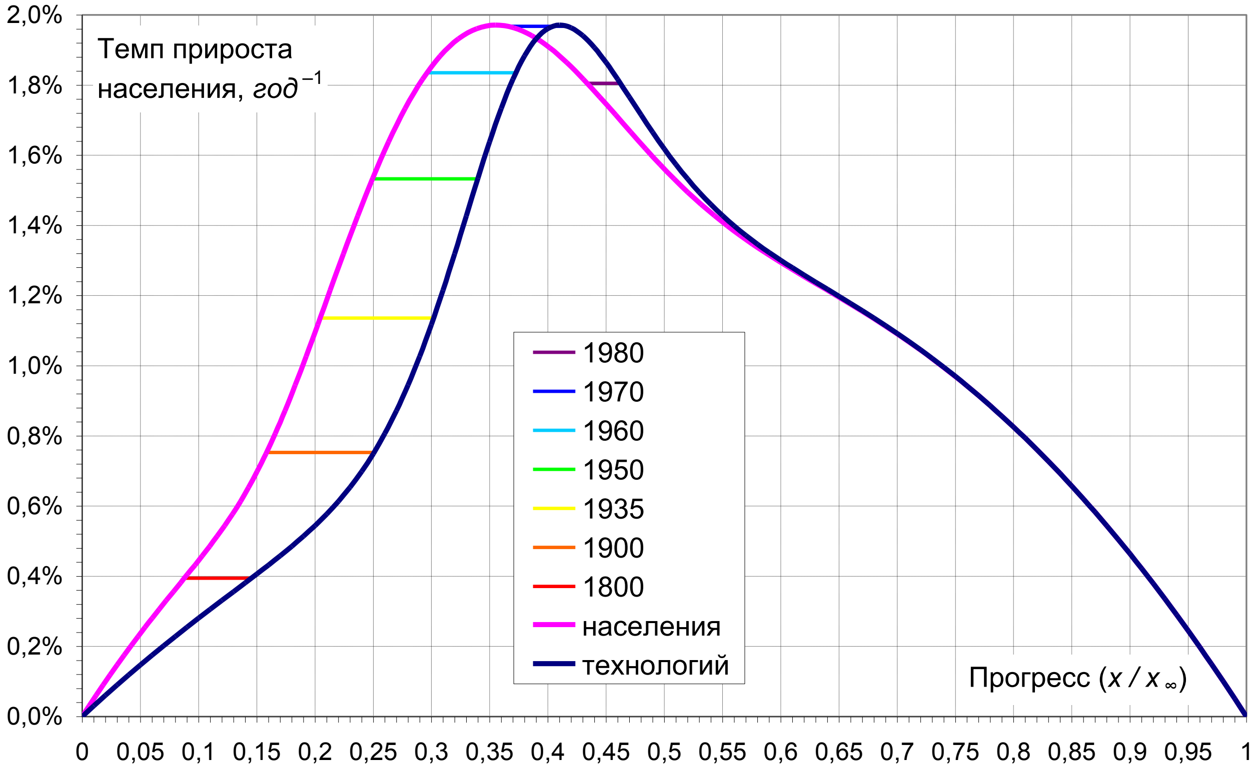


Рис. 12. Изменение среднегодового прироста и темпов прироста по ходу прогресса

Максимум графика темпов отчетливее виден в зависимости от прогресса технологий, а горизонтальный участок графика прироста – от прогресса населения (ср. с рис. 6).

На этом и следующем рисунках разным графикам соответствуют различные типы абсциссы (прогресс населения и прогресс технологий), а радугой горизонтальных стяжек обозначены значения ординат, достигаемые в годы, указанные в легенде.

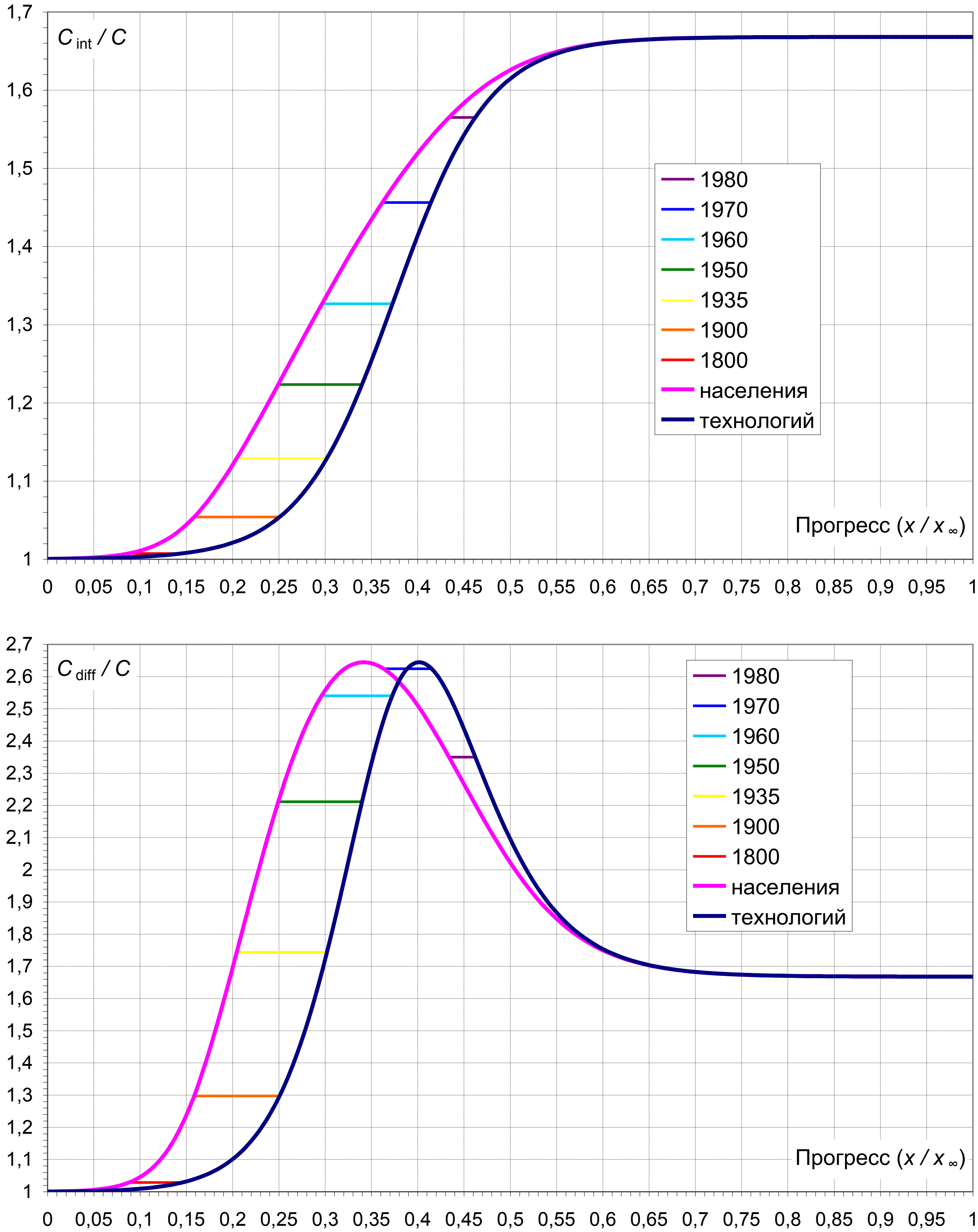


Рис. 13. Интегральная и дифференциальная емкости технологической ниши

Переход от низкой к высокой интегральной емкости является симметричным как функция демографического прогресса, но ассиметричным как функция технологического. Пик дифференциальной емкости отчетливее выражен как функция технологического прогресса.

Дифференциальная емкость имеет те же асимптотические пределы, что и интегральная, однако демографический переход сопряжен с кратковременным взлетом ее значения.

Литература

1. *Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г.* Синергетика и прогнозы будущего/ Сер. "Кибернетика: неограниченные возможности и возможные ограничения". – М.: Наука, 1997. – 285 с.
2. *Капица С.П.* Сколько людей жило, живет и будет жить на Земле. Очерк теории роста человечества. – М.: Международная программа образования, 1999. – 240 с.
3. *Kremer M.* Population growth and technological change: One million B.C. to 1990// Q. J. Econ. 1993. V.108, N3, pp.681-716.
4. Total midyear population for the world: 1950-2050. https://www.census.gov/population/international/data/idb/worldpoptotal.php
5. *Foerster H. von, Mora P.M., Amiot L.W.* Doomsday: Friday, 13 November, A.D. 2026// Science. 1960. V.132, N3436, pp.1291-1295.
6. *Cohen J.E.* How many people can the Earth support? W.W. Norton & Company. New York – London. 1995.
7. Historical estimates of world population. https://www.census.gov/population/international/data/worldpop/table_history.php
8. *Ичас М.* О природе живого: Механизмы и смысл. – М.: Мир, 1994. – 496 с.
9. *Коротаев А.В., Малков А.С., Халтурина Д.А.* Законы истории: Математическое моделирование развития Мир-Системы. Демография, экономика, культура/ Изд. 2-е, испр. и доп./ Отв. ред. Н.Н.Крадин. – М.: КомКнига, 2007. – 224 с.
10. Длинные ряды демографических показателей за 250 лет. http://demoscope.ru/weekly/app/long_industr.php

Содержание