

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Феноменологическая теория роста населения Земли

С.П. Капица

Из всех глобальных проблем рост народонаселения мира представляется главной. Данные демографии в количественной форме описывают этот процесс в прошлом и настоящем, и поэтому представляется существенным как понять и описать закономерности этого развития, так и продолжить его в предвидимое будущее. В предположении автомодельности можно описать развитие человечества на протяжении практически всей длительности нашей истории, полагая на основном этапе скорость роста народонаселения пропорциональной квадрату числа людей. Как большой параметр теории получен размер эффективной популяции $\sim 10^9$, а масштабом времени и микроскопическим параметром феноменологии стала продолжительность жизни человека. Главной особенностью современного периода стала демографическая революция — переход от роста к стабилизации населения Земли в обозримом будущем на расчетном уровне $\simeq 14$ млрд. Развитие количественной нелинейной теории роста населения Земли представляет интерес для демографии и антропологии, истории и социологии, для популяционной генетики и проблемы происхождения и эволюции человека, а также дает основания сделать некоторые качественные выводы о стабильности нашего развития.

PACS numbers: 01.75.+m

Содержание

1. Введение (63).
 2. Население мира как система (65).
 3. Математическая модель роста населения Земли (66).
 4. Предел населения и число людей когда-либо живших на Земле (69).
 5. Рост населения и результаты моделирования (70).
 6. Демографический переход и стабилизация населения мира (71).
 7. Трансформация темпов развития во времени (73).
 8. Устойчивость развития (76).
 9. Влияние окружающей среды (77).
 10. Заключение и выводы (78).
- Список литературы (79).

1. Введение

Проблема роста населения Земли представляется важнейшей из всех глобальных проблем. Вместе с тем ее исследование, несомненно, и сложнейшая из задач, если не найти пути к ее решению исходя из общих свойств систем, которые могут привести к уменьшению числа переменных и упрощению рассмотрения. Собственно рост народонаселения обычно рассматривают методами демографии, развитыми для описания населения

отдельных стран или регионов [1]. Но в этих статистических сведениях заключен ключ к пониманию количественных законов, в принципе, пригодных для описания динамики роста народонаселения мира. Поэтому, исходя из демографических данных, возможно сделать шаг к количественному описанию развития человечества. Для этого следует обратиться к истории за достаточно длительный промежуток времени и на возможно большем пространстве. Эта задача поставлена в данной работе, где для ее решения привлечены методы системного анализа и синергетики, созданные именно для феноменологического описания сложных систем.

Другим направлением стали модельные исследования, из которых наиболее известны отчеты Римского клуба. В этих работах сделана попытка построения достаточно полных моделей при использовании мощных вычислительных средств и банков данных, в которых учитывались бы, по возможности, большинство факторов, определяющих динамику развития человечества. Выводы такой программы, основанной на последовательной редукционистских позициях, подверглись известной критике и в настоящее время не получили убедительного продолжения.

Методы, первоначально созданные в физике и основанные на общих и фундаментальных представлениях, были с успехом применены к системам многих частиц и с большим числом степеней свободы. В последнее время такой подход получил значительное развитие при исследовании сложных физико-химических структур, а затем биологических сообществ, социальных и экономических систем.

Однако при этом существенно понять, в какой мере такой системный подход корректен и насколько можно

С.П.Капица. Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, 117334 Москва, Воробьевское шоссе 2
Тел. (095) 137-65-77
Факс (095) 938-20-30
E-mail: sergey@kapitza.ras.ru, kapitza@magnit.msk.su

Статья поступила 26 мая 1995 г., после дополнений 27 июля 1995 г.

распространить достаточно общие методы, развитые в физике, на такой объект, как население мира, где их применение по крайней мере не очевидно. В конце данной работы мы вновь вернемся к этому вопросу, но уже после того, как будет сделана последовательная попытка описать развитие населения Земли практически на всем протяжении прошлого человечества и экстраполировать его в предвидимое будущее.

В подобных междисциплинарных исследованиях — исследованиях, затрагивающих разные области знаний, — помимо обращения к широкому кругу понятий и данных есть существенная трудность взаимного объяснения методов, в первую очередь, тех допущений и упрощений, которые неизбежно сопровождают исследования такого рода. При этом многие понятия и доводы, которые кажутся самоочевидными одним, будут мало приемлемы или даже непонятны другим, а малая достоверность данных в одной области может быть некритично воспринята в другой. В этом случае некоторые вопросы неизбежно потребуют более подробного изложения, так как оно должно быть не только доступно, но и принято другой стороной. Ознакомление с фактами и методами антропологии и истории, демографии, — науки с давними и большими математическими традициями, — убедили автора в том, что такой конструктивный диалог не только возможен, но и необходим.

Наконец, проблема роста населения Земли как сложнейшая глобальная проблема охватывает не только обширный круг данных, но и оказывается связанной с идеологией и взглядами общества, затрагивает основные ценностные представления людей.

В настоящее время основное внимание привлечено к стремительному росту населения Земли. Темп роста все увеличивается и настолько велик, приближаясь к 100 млн. в год, что его стали характеризовать как демографический взрыв, способный потрясти планету (см. табл. 1). Именно неустанное увеличение населения мира требует все возрастающего производства пищи и энергии, потребления минеральных ресурсов и приводит к все увеличивающемуся давлению на биосферу планеты.

Образ все возрастающего и безудержного роста населения Земли, если его наивно экстраполировать в будущее, приводит к тревожным прогнозам и даже апокалиптическим сценариям для глобального будущего человечества [2]. В этих условиях поиск альтернативных подходов и исследования развития за возможно более длительный промежуток времени может открыть путь к более глубокому пониманию эволюции человечества и помочь в понимании того критического состояния, в котором оно находится в настоящее время.

Несмотря на всю драматичность демографического взрыва и часто очень эмоциональную реакцию, которую он вызывает, существенно то, что человечество переживает *демографический переход*. Это явление состоит в резком возрастании скорости роста популяции, сменяю-

щейся затем столь же стремительным его уменьшением, после чего население страны стабилизируется в своей численности (рис. 1). Этот переход уже пройден развитыми странами и теперь такой процесс происходит в развивающихся странах. Демографический переход сопровождается ростом производительных сил и перемещением значительных масс населения из сел в города. При завершении перехода наступает и резкое изменение возрастного состава населения.

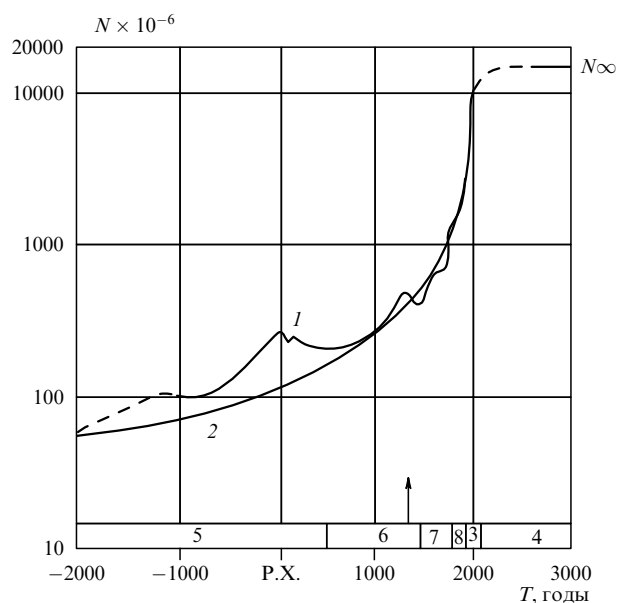


Рис. 1. 1 — население мира от 2000 г. до Р.Х. [1, 26], 2 — режим с обострением, 3 — демографический переход, 4 — стабилизация населения, 5 — древний мир, 6 — средние века, 7 — новая и 8 — новейшая история, ↑ — чума

В современном взаимосвязанном и взаимозависимом мире этот переход завершится меньше, чем через 100 лет и произойдет гораздо быстрее, чем в Европе, где аналогичный процесс начался в конце XVIII в. Теперь же переход охватывает большую часть населения Земли. Явление демографического перехода в настоящее время стало одной из важнейших проблем демографии. К процессу демографического перехода привлечено внимание многих исследователей [3].

Методами демографии возможно рассчитать изменения населения на 2–3 поколения вперед. Для этих прогнозов мир разбивается на ряд регионов, которым предписываются определенные тенденции роста. Способом, при котором происходит сведение факторов роста к таким, казалось бы, более элементарным процессам, как рождаемость и смертность, в настоящее время описывают явление демографического перехода. Однако при этом оказывается трудным, а по существу невозможным,

Таблица 1. Данные ООН (1992 г.)

Регион	Население (млрд.)			Проценты населения (середина 1990-х годов)			
	1990	2000	2025	Дети (0 ÷ 4)	Молодежь (15 ÷ 24)	Пожилые > 65	Городские жители
Население мира	5,3	6,3	8,5	12	19	6	45
Развитые страны	1,2	1,3	1,4	7	15	12	73
Развивающиеся	4,1	5	7,1	13	20	4	37
Европа	0,50	0,51	0,51	6	15	13	73

дать адекватное описание перехода в рамках редукционистской программы при последовательном восхождении от элементарного уровня к более сложному. Это происходит потому, что уровень таких понятий, как фертильность или смертность также есть уровень не элементарный, а феноменологический, обобщающий в этих показателях множество факторов. Наконец, в сложной многофакторной системе, которую являет собой человечество, все связи и взаимодействия существенно нелинейны и не допускают такого простого суммирования и линейных причинно-следственных отношений, непосредственного перехода от частного к общему.

Альтернативой может быть только последовательно системный подход, когда все население Земли рассматривается как эволюционирующая и самоорганизующаяся система, существенно нелинейная в своем поведении. Эта концепция и лежит в основе математической модели, которая с таких позиций охватывает развитие всего человечества. Однако сама возможность такой постановки задачи далеко не очевидна, в первую очередь потому, что не ясно, в какой мере понятие системы применимо к населению Земли в целом и обладает ли процесс роста исторически и статистически предсказуемым характером.

2. Население мира как система

Возможность рассмотрения населения мира как системы, как единого и замкнутого объекта, который достаточно характеризовать числом людей в данный момент, долгое время отрицался в демографии. Ряд демографов в населении мира видели только сумму населения всех стран и не имеющую смысл объективной динамической характеристики [4]. Однако в настоящее время такой взгляд, по существу, отошел в прошлое. Более того, и в самой демографии все больше развивается системно-исторический подход, ставший характерной чертой современных исследований [1].

Данные по росту населения основных регионов мира показывают с одной стороны на общий неизменный рост, с другой стороны — на разброс траекторий этого развития. Суммарный рост населения мира представляет уже более упорядоченную картину, процесс с вполне выраженной тенденцией к стремительному росту, происходящий в настоящее время (см. рис. 1 и рис. 2).

Для применения к населению Земли понятия *системы* существенно то, что все ее регионы и части взаимодействуют между собой. Действительно, ключевое понятие для системы — это взаимодействие. Именно взаимосвязанность и взаимозависимость современного мира, обусловленная транспортными и торговыми связями, миграционными и информационными потоками, объединяют всех в целом и дают неоспоримые возможности рассматривать сегодня мир как систему. На протяжении данной работы мы неоднократно будем выяснять, в какой мере население мира ведет себя как система и какими явлениями это определяется.

Но в какой мере такой подход справедлив в прошлом? Мы увидим, что в рамках самой модели можно будет сформулировать критерий системности роста. И в далеком прошлом, когда людей было мало и мир в значительной степени был разделен, все равно его популяции медленно, но верно взаимодействовали. Это время можно оценить и показать, что системный подход,

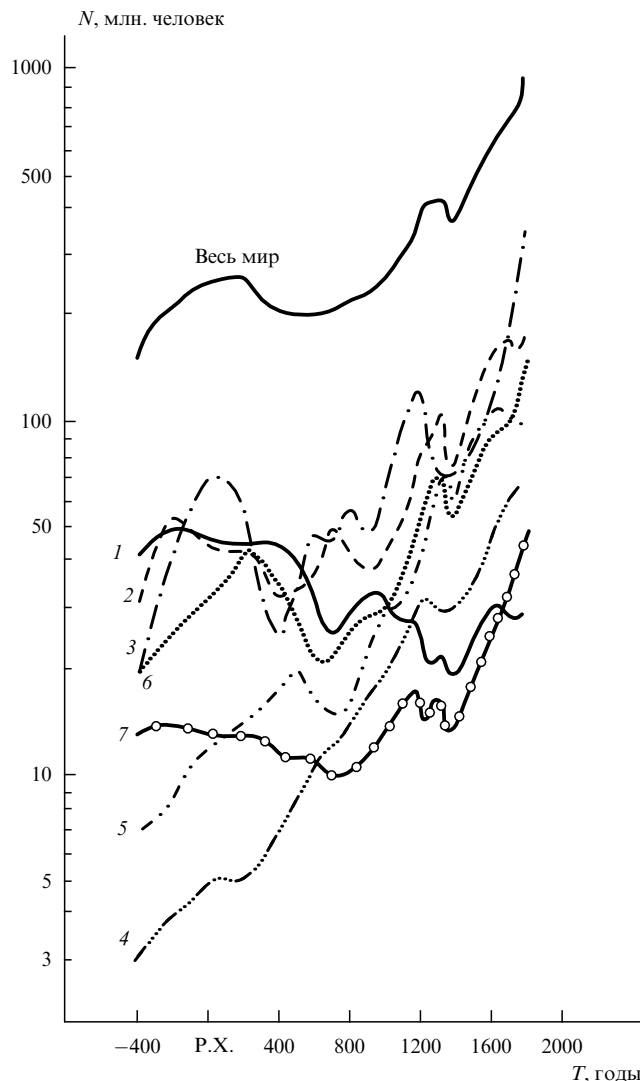


Рис. 2. Рост численности населения мира и его крупных регионов от 400 г. до Р.Х. до 1800 г. [1]. 1 — Юго-Западная Азия, 2 — Индостанский субконтинент, 3 — Китай, 4 — остальная Азия, 5 — Африка (без Северной), 6 — Европа (без СССР), 7 — СССР

охватывающий все население Земли, в большинстве случаев применим и тогда.

Следует также подчеркнуть, что для населения Земли в целом не следует учитывать миграцию, играющую такую роль в балансе населения отдельной страны или региона, поскольку в масштабе планеты просто некуда пока эмигрировать. При таком обобщенном подходе процесс миграции есть лишь один из механизмов внутрисистемных взаимодействий. Именно из-за миграции и войн на исторически существенных промежутках времени происходит перемешивание населения мира, позволяющее рассматривать его как единую систему. Однако при прекращении обмена и долговременной изоляции какой-либо популяции она перестанет быть частью большой системы.

Наконец, существенно и то, что биологически все люди принадлежат одному виду *Homo Sapiens*, у них одинаковое число хромосом — 46, отличное от всех других приматов, а все расы способны к смешению и социальному обмену [5]. Более того, человечество представляет сравнительно однородный вид [6]. Но по своей

численности мы превышаем сравнимых с нами животных на *пять порядков*. Только домашние животные, живущие около человека, не ограничены в своей численности, как их дикие родственники, каждая из которых занимают свой ограниченный ареал, свою экологическую нишу. Человечество проживает практически на всех удобных для обитания частях Земли, и в своей деятельности человек создал *свою окружающую среду*. Есть основания утверждать, что на протяжении последнего миллиона лет человек биологически мало изменился, и все основное развитие и самоорганизация человечества происходили в социальной сфере [5].

Именно эти процессы социального, технологического и экономического развития количественно описываются феноменологической математической моделью, интерпретируя данные демографии на основе системного подхода и синергетики [7, 8], что поможет ввести в антропологию новые методы и представления. Предложенная модель дает эскиз количественной теории, которая должна побудить к дальнейшему развитию как самих методов исследования, так и проблемы, затрагивающей, по существу, каждого из нас.

3. Математическая модель роста населения Земли

Создание модели состоит в последовательном применении принципов анализа динамических систем к данным демографии и антропологии. Эти сведения мало известны физикам, но в них можно увидеть хорошо знакомые образы и понятия. При этом на каждом шагу следует учитывать, что как сами данные, так и модель только приблизительно описывают действительность. Эту степень приближения следует оценивать и на ее основе определять применимость тех или иных представлений. Возможно, что этот процесс последовательного построения модели более всего развит в теоретической физике. Однако перенесение таких методов построения модели, которая могла бы претендовать на то, чтобы дорасти до статуса теории, далеко не очевидно, скорее даже невероятно. Тем не менее для столь сложного объекта, как население Земли, оказывается, что такой подход осуществим в силу самой многосложности этой системы. Именно тогда, когда сильно взаимодействуют столько различных факторов и механизмов, оказывается возможным статистический подход. При этом можно ожидать, что будут осредняться как пространственные и временные неоднородности, так и то множество обстоятельств и процессов, связанных между собой и определяющих то, что называют системным поведением. Так будут выявляться те главные закономерности, которые объективно проявляются в динамике роста населения мира. Ниже изложение основано на результатах по созданию такой математической модели [9–12].

Население мира в момент времени T мы будем характеризовать числом людей $N(T)$. Процесс роста будет рассматриваться на значительном интервале времени — очень большом числе поколений. В этом случае можно ожидать, что сама длительность поколения — продолжительность жизни человека не будет явно входить в расчет, равно как и распределение людей по возрасту и полу.

В системном анализе тогда, когда имеется многофакторный процесс и множество степеней свободы, обла-

дающего, однако, статистической стационарностью, следует ожидать, что рост происходит самоподобно. При этих условиях в основе моделирования лежит предположение о его однородной по времени *автомодельности*, что выражается в масштабной инвариантности этого процесса.

Смысл этой основной гипотезы состоит в том, что утверждается постоянство относительной скорости роста системы

$$\lim_{\Delta N, \Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{N - N_1} \frac{T - T_1}{\Delta T} = \frac{d \ln |N - N_1|}{d \ln |T - T_1|} = \alpha, \quad (1)$$

где N_1 и T_1 — опорные значения численности и времени. В большинстве случаев $N_1 = 0$.

Соотношение (1) приводит к тому, что самоподобный рост с необходимостью должен описываться степенными законами вида $N = C(T_1 - T)^\alpha$, где C и α суть постоянные. В таких самоподобных процессах проявляется постоянство отношений изменений численности населения и времени. Простейший, но далеко не единственный пример такого рода — линейный рост, когда $\alpha = 1$. Рост по геометрической прогрессии (экспоненциальный рост) или развитие по логистическому закону [13, 14] этому условию уже не удовлетворяют, так как появляется внутренний масштаб времени — время удвоения и масштабной инвариантности, т.е. скейлинга, нет.

Поиск автомодельного решения есть первый шаг в создании модели, и для описания роста населения мира Форстер [15] предложил эмпирическую формулу

$$N = \frac{179 \times 10^9}{(2027 - T)^{0,99}}, \quad (2)$$

где соответствующие значения постоянных

$$C = (179 \pm 0,14) \times 10^9, \quad T_1 = 2027 \pm 5, \\ \alpha = -0,99 \pm 0,009$$

получены в результате статистической обработки методом наименьших квадратов большого объема данных по населению мира от Рождества Христова (Р.Х.) до 1960 г. Точность предложенного значения для α представляется несколько преувеличенной и в дальнейшем будет принято значение $\alpha = -1$. Заметим, что позднее Хорнер [16] предложил аналогичное выражение

$$N = \frac{C}{T_1 - T} = \frac{200 \times 10^9}{2025 - T} \quad (3)$$

при $\alpha = -1$. Приведенные формулы с удивительной точностью описывают рост населения Земли в течение сотен и даже многих тысяч лет.

Это выражение описывает рост как процесс самоподобного развития, следующий гиперболическому закону эволюции, так называемый *режим с обострением*, подробно изученный в современных исследованиях нелинейных явлений [17, 18]. Таким образом, демографический взрыв представляется как глобальная системная неустойчивость, характерная для роста существенно нелинейных систем.

Однако выражения (2) и (3) тем не менее принципиально ограничены некоторой областью, где они применимы. Во-первых, по мере приближения к $T_1 = 2025$ году

население мира будет стремиться к бесконечности. Этот вывод, из-за чего эта формула получила некое распространение, заставил некоторых считать 2025 год как время наступления Судного Дня. Во-вторых, в далеком прошлом получается столь же абсурдный результат, так как 20 миллиардов лет тому назад при сотворении Вселенной должно было присутствовать 10 человек, несомненно обсуждавших все величие происходящего!

Таким образом, автомоделное решение (2) ограничено как в будущем, так и в прошлом, и справедливо поставить вопрос: где границы его применимости? Действительно, теория автомоделных процессов указывает на то, что такие степенные решения верны только как промежуточно асимптотические [19]. Иными словами, предложенные выражения применимы только в определенной области, которую и следует установить.

Обратимся к тем 10 старцам, которые предположительно жили 20 миллиардов лет тому назад. Если бы такие космологи и существовали, то они должны были бы жить по миллиарду лет, что так же нелепо, как и сам факт их бытия. С другой стороны, стремительный рост человечества по мере приближения к T_1 означает, что его численность должна была бы удваиваться в 2024 году за один год, что в равной степени невозможно, поскольку предельная скорость роста населения также ограничена.

Фактор, который следует учесть, есть время, характеризующее жизнь человека — его репродуктивную способность и продолжительность жизни. Этот фактор проявляется в длительности демографического перехода и характерен для всех типов населения, что хорошо видно на примерах как отдельных развитых стран, так и развивающихся стран, в частности, представляющих регионы Африки, Азии и Южной Америки (рис. 3). Демографический переход для населения всего мира представлен на рис. 8 (см. раздел 6). Существенно отметить, что скорость роста проходит именно через максимум, а не устанавливается на своем наибольшем значении.

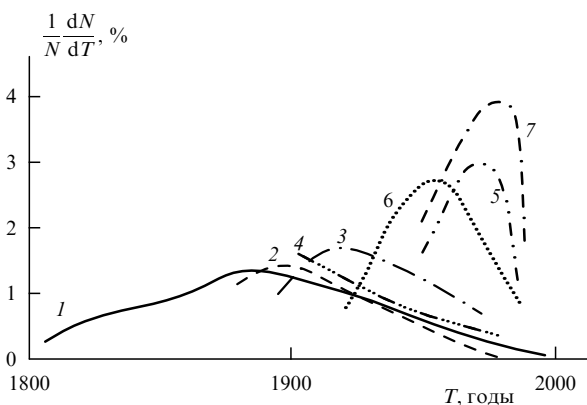


Рис. 3. Прохождение населения стран через демографический переход [3]. 1 — Швеция, 2 — Германия, 3 — СССР, 4 — США, 5 — Маврикий, 6 — Шри Ланка, 7 — Коста Рика

В начальный же период роста, когда N мало, при T_0 минимальная скорость роста не может быть меньше появления одного человека за характерное время τ . Это условие следует рассматривать как приближенное представление непрерывности, пригодное для описания начального периода развития. С другой стороны, по

существу, таким же образом, по мере приближения к T_1 должна быть ограничена максимальная скорость роста, что может быть, начиная с T_0 , выражено неравенством

$$\left(\frac{dN}{dT}\right)_{\min} \Big|_{T \rightarrow T_0}^{N \rightarrow 1} \geq \frac{1}{\tau} \geq \left(\frac{1}{N} \frac{dN}{dT}\right)_{\max} \Big|_{T \rightarrow T_1} \quad (4)$$

Указанные ограничения и математические особенности развития автомоделного роста устраняются тем, что скорость роста последовательно описывается тремя уравнениями (эпохи А, В и С)

$$A: \frac{dN}{dT} = \frac{N^2}{C} + \frac{1}{\tau}, \quad (5a)$$

$$B: \frac{dN}{dT} = \frac{C}{(T_1 - T)^2} \quad (5b)$$

и для последнего этапа роста

$$C: \frac{dN}{dT} = \frac{C}{(T_1 - T)^2 + \tau^2} \quad (5c)$$

Таким образом, если ввести в модель характерное для жизни человека время τ как микроскопический параметр феноменологии, то удастся не только определить пределы применимости (2), но и продолжить это решение как в прошлое, так и в будущее, учитывая асимптотический характер решений, охватывающие всю историю человечества от T_0 . Введение τ практически ограничивает область предельного перехода в (1).

Значение постоянных, определяющих решение, получается на основе сравнения современных демографических данных (см. табл. 3, раздел 5) с расчетами по формуле, полученной интегрированием (5с)

$$N = \frac{C}{\tau} \operatorname{arccctg} \left(\frac{T_1 - T}{\tau} \right), \quad (6)$$

описывающей эпоху В до демографического перехода и сам переход.

Соответствующие значения постоянных, определенные с точностью нескольких процентов, составляют

$$C = (186 \pm 1) \times 10^9, \quad T_1 = 2007 \pm 1,$$

$$\tau = 42 \pm 1, \quad K = \left(\frac{C}{\tau}\right)^{1/2} = 67000.$$

Наилучшее приближение дается моделью III из того ряда вариантов, которые представлены в табл. 2. Обратим внимание на то, что точность даже современных демографических данных составляет 3 ÷ 5 % [21], однако в демографии традиционно приводят больше значащих цифр из-за этических трудностей при округлении числа людей учтенных при переписи.

Расчеты показывают, что значения T_1 и C от значений τ зависят слабо. Выбор же значения τ определяется, по существу, ростом населения мира вблизи T_1 , т.е. практически после 1960 г. [17, 18]. Для этого помимо самих значений $N(T)$ следует обратиться к значениям абсолютной скорости (5с) и относительной скорости роста

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dT} = \frac{\tau}{[(T_1 - T)^2 + \tau^2] \operatorname{arccctg}[(T_1 - T)/\tau]}, \quad (7)$$

Таблица 2

Модель	N_∞ млрд.	C 10^{-9} год $^{-1}$	τ год	T_1 год	$\left(\frac{dN}{dT}\right)_{T_1}$ 10^{-6} , max год $^{-1}$	$\frac{1}{N} \frac{dN}{dT}$ max, %	T_{\max}	N_{1990} 10^{-6}	$T_{0,9N_\infty}$	K 10^{-4}	T_0 10^{-6} год	$P_{0,1}$ млрд.
I	10	180	55	1998	60	1,31	1964	5260	2157	5,72	4,9	99
II	13	185	45	2005	92	1,60	1986	5135	2143	6,41	4,5	102
III	14	186	42	2007	105	1,73	1989	5253	2138	6,66	4,4	103
IV	15	190	40	2010	119	1,81	1993	5259	2133	6,89	4,3	106
V	18	195	33	2017	180	2,18	2003	5230	2119	7,69	4,0	110
VI	25	200	25	2022	320	2,88	2011	5306	2099	8,94	3,5	114
VII	∞	200	(20)	2025	—	—	—	5713	—	(10)	(3,1)	115

которое проходит через свое максимальное значение

$$\left(\frac{1}{N} \frac{dN}{dT}\right)_{\max} = \frac{0,725}{\tau}$$

при $T_{\max} = T_1 - 0,43\tau$ и достигло 1,7% в 1989 г. Скорость роста (5с) пройдет через максимум при T_1 или в 2007 г. при значении $\tau = 42$ года, принятое как оптимальное в модели III. Из-за перенормировки и введения τ значение T_1 сдвигается от 2027 г. к 2007 г. (рис. 4).

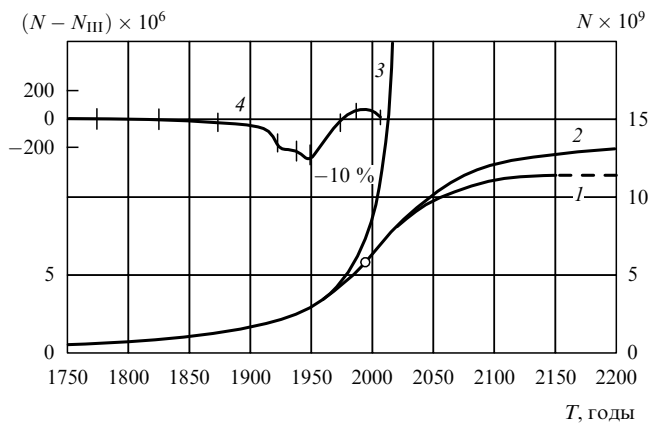


Рис. 4. Рост населения мира с 1750 г. по 2200 г. 1 — прогноз ООН и ПАСА, 2 — модель, 3 — уход на бесконечность (2), 4 — разница между населением мира и расчетом по модели III, увеличенная в 5 раз, \circ — настоящее время

В принципе, возможно введение двух значений τ — для начальной эпохи и для нашего времени. Однако вычисления показывают, что этого не требуется и можно ограничиться одним значением τ . Само значение $\tau = 42$ весьма удовлетворительно отражает некоторую среднюю характеристику для жизни человека, хотя это число получено из обработки демографических данных как характеристика глобального демографического процесса, а не привнесено из опыта жизни, которому она вполне отвечает.

Для того чтобы лучше понять смысл этих решений, целесообразно ввести безразмерные переменные

$$t = \frac{T - T_1}{\tau} \quad (8)$$

и

$$n = \frac{N}{K}, \quad (9)$$

где время измеряется в единицах τ , а население — в единицах K . K — это главный безразмерный параметр теории, большое число, которое определяет тот значительный диапазон времени и численности в тех асимптотических выражениях, которыми на трех участках последовательно описывается рост — эпохи А, В и С. Величину K можно рассматривать как естественный масштаб размера популяции.

При введении t и n уравнения (5a,b,c) и их решения примут вид

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n^2 + 1}{K}, \quad n = -\text{ctg} \frac{t}{K}, \quad (10a)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n^2}{K}, \quad nt = -K, \quad (10b)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{K}{t^2 + 1}, \quad n = -K \text{arccot} t, \quad (10c)$$

где видна сопряженность этих формул при замене n на t и как соответственно исключаются сингулярности роста при $n \rightarrow 0$ и $t \rightarrow 0$. В начале роста при T_0 независимой переменной является T , но вблизи T_1 при прохождении демографического перехода переменные как бы меняются местами и развитие событий определяется больше ростом населения, чем временем, хотя физически время независимо. Для эпохи В обе переменные входят в выражение для роста (10b) одинаковым образом. Как одно решение асимптотически переходит в другое видно, если обратиться к разложению в ряд выражений для роста от T_0 и T_1 :

$$n = -\frac{K}{t} \left(1 - \frac{1}{3t^2} + \frac{1}{5t^4} - \dots\right), \quad t^2 > 1, \quad (11)$$

$$n = -\frac{K}{t} \left(1 - \frac{t^2}{3K^2} - \frac{t^4}{45K^4} - \dots\right), \quad t^2 < K^2\pi. \quad (12)$$

Эти функции пересекаются при $t_* = -\sqrt{K}$ под углом $2/3K$, по существу, путем гладкого перехода при больших значениях K .

Время начала роста в эпоху А определится как

$$T_0 = T_1 - \frac{\pi}{2} K\tau = T_1 - \frac{\pi}{2} \sqrt{C\tau} \quad (13)$$

или $T_0 = -4,4 \times 10^6$ лет тому назад для модели III. Естественно, что начало роста можно отсчитывать от T_0 и строить решение от $t_0 = -\pi K/2$, а исключив t из (10c), написать одно автономное уравнение роста, годное

для всех времен

$$\frac{dn}{dt} = K \sin^2 \frac{n}{K} + \frac{1}{K} \tag{14}$$

и представить полное, но малоудобное решение задачи Коши в виде

$$n = K \arctg \left(\frac{1}{\sqrt{K^2 + 1}} \operatorname{tg} \frac{\sqrt{K^2 + 1}}{K^2} t' \right), \tag{15}$$

где время t' отсчитывается от t_0 и $n_0 = 0$.

При всей элементарности этих выкладок подчеркнем их соответствие фундаментальным требованиям системного подхода, приведенное к постановке и решению демографической задачи. Развитие этого решения должно быть связано с привлечением более отвлеченных методов теоретической физики и нелинейной механики.

Для того чтобы пояснить, в чем состоит механизм роста, обратимся к выражению для скорости роста в эпоху В

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N^2}{K^2},$$

где параметр K определяет скорость роста в результате парного, бинарного взаимодействия. Однако эту формулу следует рассматривать и как простейшее выражение для коллективного взаимодействия, квадратичное по N , которое и моделирует все социальные и экономические процессы. Такое взаимодействие можно рассматривать как суммарный и осредненный результат всех процессов, происходящих в системе населения Земли и представляющий, таким образом, феноменологическое описание механизма роста. Способность человека размножаться есть только часть этого процесса, однако результирующий рост определяется не только и не столько скоростью размножения, сколько тем, как общество может обеспечить итоговый рост путем развития производительных сил и самой организацией общества, в том числе образованием и охраной здоровья.

Это результирующее взаимодействие определяет рост системы. Разложение же этого самосогласованного взаимодействия на отдельные составляющие в рамках феноменологической модели, по существу, представляет значительные трудности. Этому препятствует как сложность этих процессов, так в еще большей степени нелинейность этой системы. Однако при этом остается в силе возможность интегративного описания динамики системы, которое должно удовлетворять некоторым общим условиям. Эти условия суть статистическое постоянство процесса роста и асимптотический характер тех выражений, которыми этот рост описывается. Иными словами, предполагается, что основной процесс происходит по неизменному закону, и константы, его выражающие, не эволюционируют. Это обстоятельство приводит к самоподобию развития, главному предположению, положенному в основу модели (рис. 5).

С формальной точки зрения взаимодействие, пропорциональное N^2 , можно рассматривать как первый член разложения в ряд по степеням N . В силу того, что безразмерная константа взаимодействия K велика, можно предположить, что вклад следующих членов будет мал. Во всяком случае, следует ожидать, что как пространственная неоднородность, так и флуктуации,

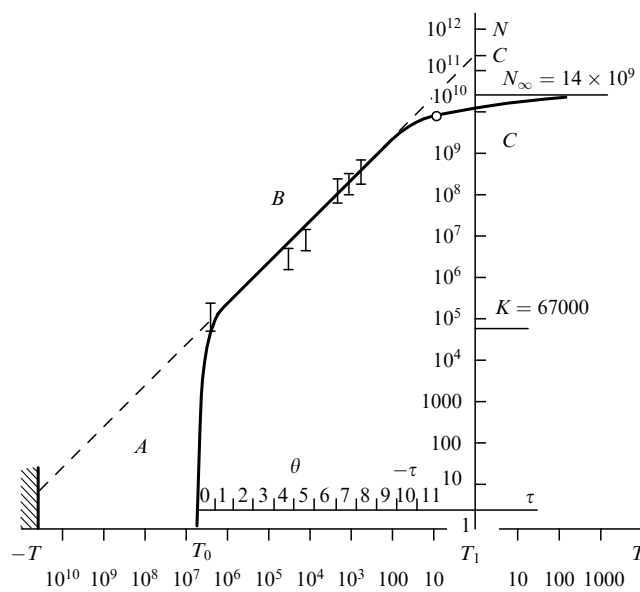


Рис. 5. Население мира от возникновения человечества до предвидимого будущего. Данные [5, 26] и Коппенса [23], $\theta = \ln t'$ (22), ---- (2), \circ — настоящее время

которые существенны в рассматриваемой системе, будут больше, чем поправки к основному члену разложения по степеням N выше второй.

С другой стороны, подчеркнем, что результирующее взаимодействие, которое можно определить как кооперативное взаимодействие, удовлетворительно описывает рост населения Земли на много порядков величин и в значительном диапазоне времен, естественно ограниченного только внутренним — микроскопическим — параметром τ . Это развитие настолько медленно в начале, что к нему надо добавить линейную часть, чтобы обеспечить рост при малых N . В дальнейшем в эпоху В квадратичный член растет намного быстрее линейного (и экспоненциального) роста, поскольку гиперболический рост расходуется в конечное время T_1 . Наконец, тогда, когда скорость относительного роста достигает предельных значений, в процессе демографического перехода происходит резкое изменение роста и стабилизация населения мира. Скорость самоускоряющегося роста не зависит явно от внешних условий и потому определена только собственными системными характеристиками — параметром K и τ , через которые выражаются все существенные для описания системы величины.

4. Предел населения и число людей когда-либо живших на Земле

На основе полученных выражений легко определить предел, к которому стремится численность человечества в обозримом будущем

$$N_\infty = \pi K^2 = 14 \times 10^9, \tag{16}$$

и момент, когда население мира достигнет 90 % предельного асимптотического значения $0,9N_\infty$ и отстоящего от T_1 на 3τ .

Для целей популяционной генетики, антропологии и демографии неоднократно делались оценки общего

числа людей, когда-либо живших на Земле. Это можно сделать, если проинтегрировать выражение для процесса роста от T_0 до T_1

$$P_{01} = K \int_{T_0}^{t_*} \operatorname{ctg} \frac{t}{K} dt + K \int_{t_*}^0 K \operatorname{arccctg} t dt = \\ = \frac{1}{2} K^2 \ln K + \frac{1}{2} K^2 \ln(1 + K) \simeq K^2 \ln K \quad (17)$$

или, соответственно, для модели III $P_{III} = 2K^2 \ln K = 100 \times 10^9$. При пересечении решений при $t_* = -\sqrt{K}$ или $T_* = T_1 - \tau\sqrt{K} \simeq 9000$ лет до н.э. на свет явилась половина всех людей, которые жили между T_0 и T_1 . В начальную эпоху А произошло соответственно

$$P_A = 2K \int_0^K \operatorname{tg} \frac{t'}{K} dt' = 2K^2 \ln \cos 1 = 5,5 \times 10^9 \quad (18)$$

гоминидов. В этих оценках $\ln K = 11,1$, а средняя длительность жизни человека принята равной $\tau/2 = 21$ году, что удваивает значения интегралов (17) и (18). Так, эти оценки приведены в соответствии с продолжительностью жизни 20 лет, принятой в расчетах Вейсса [20] и Хейфеца [21], разбивших процесс роста на ряд экспоненциальных участков и получивших значения для P от 80 до 150 миллиардов. Оценка же $P_{0,1} = (C/20) \ln K$ практически не зависит от τ и варианта модели.

В заключение заметим, что всю картину роста лучше всего представлять в двойном логарифмическом масштабе. Это не только вопрос удобства, когда надо описать поведение величин, изменяющихся на 10 порядков, но это обстоятельство имеет более глубокий смысл. Именно в двойном логарифмическом масштабе все степенные законы — законы автомодельного развития описываются прямыми линиями, что указывает на постоянство логарифмической относительной скорости роста, поскольку все точки на прямой не выделены одна относительно другой (см. (1)). В дальнейшем мы увидим, что логарифмический масштаб времени позволит по-новому взглянуть на темпы развития и периодизацию всей истории человечества.

5. Рост населения и результаты моделирования

Сравнение модели с данными палеоантропологии и палеодемографии дает возможность описать развитие человечества за гигантский период времени. Начальная эпоха А началась 4,4 миллиона лет тому назад и продолжалась $\Delta T_A = K\tau = 2,8$ миллиона лет. Так модель в общих чертах описывает первоначальный этап роста человечества, который может быть отождествлен с эпохой отделения гоминид от гоминоидов, начавшегося по представлениям современной антропологии 4,5 миллиона лет тому назад [5, 22]. К концу эпохи А появился *Homo habilis*, а сама его численность возросла до величины $N_{A,B} = K \tan t/K = K \tan 1 = 1,04 \times 10^5$. Эта оценка хорошо сравнивается с оценкой 10^5 , данной Коппенсом [23] для этого существенного момента в развитии человечества, времени, когда в нижнем Палеолите в Африке появился "человек умелый".

Следует особо подчеркнуть условность этого описания начальной эпохи развития человечества. Его смысл

следует видеть в первую очередь в оценке времени начала роста, эпохи, когда только формировалась первая популяция наших очень далеких предков. Этот процесс сопровождался сильными флуктуациями и занял почти 3 миллиона лет и привел к появлению племени, популяции с численностью порядка K . Именно тогда произошел качественный переход в эволюции человека и начался тот процесс социального развития, который описывается моделью кооперативного роста, а само человечество начало не только самоускоренно расти, но и постепенно заселять весь земной шар [5, 24, 25] (рис. 6).

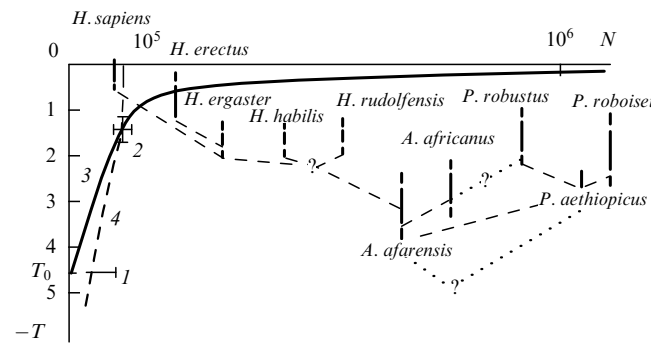


Рис. 6. Отделение гоминидов от гоминоидов в начальную эпоху А [22] и рост числа гоминидов. 1 — [20], 2 — [23], 3 — (11а), 4 — (11б)

Эпоха В охватывает Палеолит, Неолит и исторический период. За этот важнейший отрезок времени длительностью 1,6 миллионов лет число людей еще раз выросло в K раз. Ко времени наступления демографического перехода, которое можно отнести к $T_1 - \tau = 1965$ году, расчетное население Земли составило уже $(\pi/4)K^2 = 3,5$ миллиарда. Систематический и неизменный рост происходил в Евразийском пространстве, по которому кочевали племена и мигрировали народы, формировались языки и обычаи. Позднее существенную роль играли торговые пути и наибольшее значение имел Великий шелковый путь, соединяющий Китай и Европу, а также Индию, и по которому, начиная с античности, шел интенсивный межконтинентальный обмен, распространялись мировые религии.

Данные по населению мира во всем диапазоне времен удовлетворительно укладываются в предложенную модель. Но чем дальше мы уходим в прошлое, тем точность данных по населению мира уменьшается [3, 26]. Так, для времени Р.Х. оценки палеодемографов дают от 100 до 250 миллионов человек, в то время, когда по расчету следует ожидать для населения мира около 100 миллионов, что, в частности, соответствует оценке, приведенной в Заявлении академий наук по демографии, сделанном в 1993 г. в г. Дели (см. [15]). Более точные сведения известны только от Нового времени, начиная с XVI в., после Великих географических открытий. Тогда же начался постепенный процесс объединения мира в единую демографическую систему — процесс, который завершается в наше время.

Согласие следует считать удовлетворительным вплоть до самого начала появления человечества. Это тем более удивительно, что расчет подразумевает постоянство констант роста, которые определены на основании современных данных и которые применены и

к далекому прошлому, указывая на то, что модель верно схватывает основные черты роста населения мира.

Поучительно сравнение расчетов модели с прогнозами демографии на ближайшее будущее. Математическая модель указывает на асимптотический переход к пределу 14 миллиардов, причем 90 % предельной численности, равной 12,5 миллиардов, следует ожидать к 2135 г. Эти данные можно сравнить с расчетами ООН [27] и Международного института прикладного системного анализа (ИАСА) [28] (рис. 7).

Прогноз ООН основан на суммировании ряда сценариев для фертильности и смертности по девяти регионам мира и доведен до 2150 г. По оптимальному сценарию ООН население Земли к этому сроку выйдет на постоянный предел 11 600 миллионов, который затем экстраполируется до 2200 г. Прогнозы ИАСА охватывают меньший диапазон времени — до 2100 г. и основаны на разделении мира на шесть регионов при десяти сценариях развития. Оптимальным полагается вариант № 7 — медленного спада фертильности, при котором расчеты ООН и ИАСА практически совпадают. Модельный расчет лежит несколько выше этих прогнозов (табл. 3).

Следует подчеркнуть, что расчеты демографов обладают не только известной произвольностью, но и математически неустойчивы, так как небольшой сдвиг на 2–3 года в предположениях об изменении фертильности или

Таблица 3. Рост населения мира

Год	$10^{-6}N$	$10^{-6}N_{III}$
$-4,4 \times 10^6$	(0)	0
$-1,6 \times 10^6$	0,1	0,1
-35000	1÷5	5
-15000	3÷10	11
-7000	10÷15	21
-2000	47	46
0	100÷230	93
1000	275	185
1500	450	366
1650	550	519
1750	728	717
1800	907	887
1850	1170	1158
1900	1617	1656
1920	1811	1992
1930	2020	2211
1940	2295	2480
1950	2515	2812
1955	2752	3009
1960	3019	3230
1965	3336	3478
1970	3698	3758
1975	4080	4073
1980	4450	4426
1985	4854	4820
1990	5292	5253
1995	5765	5724
2000	6251	6265
2005	6729	6746
2010	7561	7572
2025	8504	8749
2050	10019	10427
2075	10841	11462
2100	11185	12034
2125	11390	12398
2150	11543	12648
2200	11600	12946
2500	UN ↑	13536

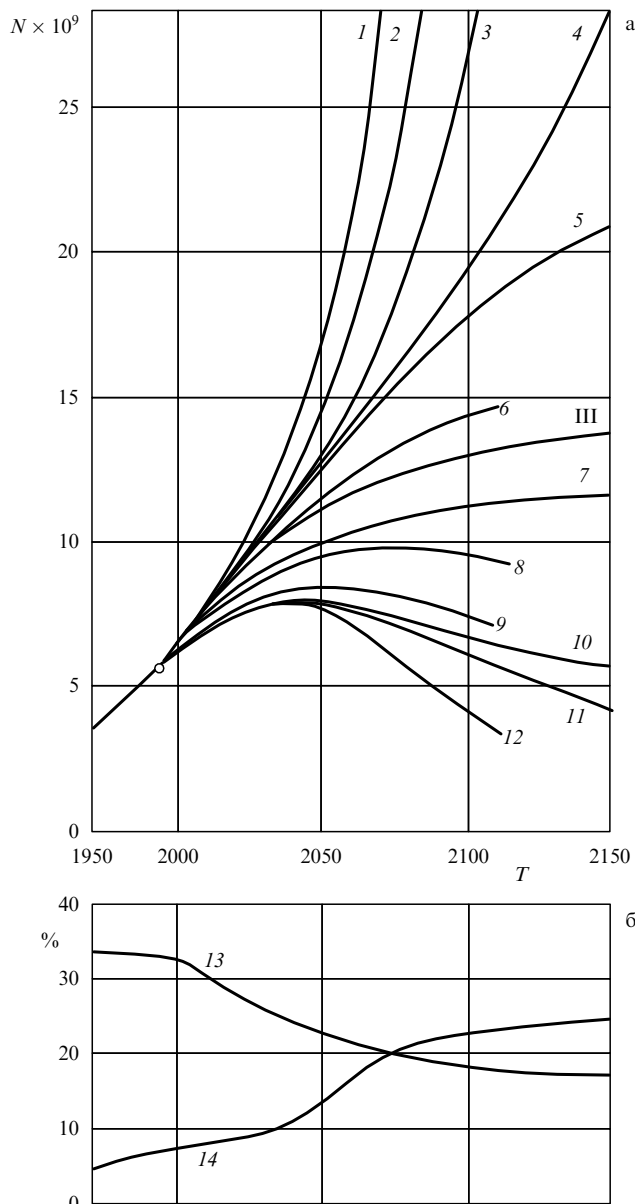


Рис. 7. (а) Проекция населения мира согласно прогнозам ООН [27] и ИАСА [28]. 1 — постоянная фертильность, 2 — постоянная скорость роста, 3 — кризис III Мира, 4 — высокий вариант ООН, 5 — средневысокий вариант ООН, 6 — медленный спад фертильности, 7 — средний спад фертильности, 8 — медленное снижение смертности, 9 — постоянная смертность, 10 — средненизкий вариант ООН, 11 — низкий вариант ООН, 12 — быстрое снижение фертильности. III — модель III, o — настоящее время. (б) Изменения возрастного состава населения мира при демографическом переходе. 13 — моложе 15 лет, 14 — старше 65 лет по среднему варианту ООН [27]

смертности приводит к быстрорастущим последствиям. Поэтому такие расчеты хорошо работают на небольшом интервале времени. За последние десятилетия, как указывает Садык [29], прогнозы демографии неоднократно пересматривались в сторону их повышения.

6. Демографический переход и стабилизация населения мира

Демографический переход для населения мира представляет совершенно особый период, требующий отдельного обсуждения. Как уже было указано, его начало

можно отнести к 1965 г., а конец — к $T_1 + \tau = 2049$ году. Таким образом, длительность перехода составляет $2\tau = 84$ года. За это время население мира возрастет в 3 раза. Для описания демографического перехода Шене [3] ввел понятие демографического мультипликатора M , которое в рамках модели можно определить как

$$M = \frac{N(T_1 + \tau)}{N(T_1 - \tau)} = \frac{\text{arccctg } 1}{\text{arccctg}(-1)} = 3. \quad (19)$$

В этом случае начало перехода отнесено к моменту наивысшего набора скорости роста населения, а конец — к наибольшему спаду прироста населения в соответствии с оценками, сделанными выше. Шене приводит следующие значения M : для Китая $M = 2,46$, Индии $M = 3,67$ и для мира $M = 2,95$, в хорошем согласии с результатами расчета несмотря на то, что в некоторых случаях, как Франция $M = 1,67$ или Мексика $M = 7$, есть расхождение с (19), что частично обязано известному произволу в определении временных границ перехода.

В масштабе всей истории человечества переходный период занимает 1/50 000 полной длительности развития, однако 1/10 всех людей, когда-либо живших, проживут в это время, так что шансы попасть в этот драматический период не так малы, как это следует из его продолжительности. Такую одновременность и остроту перехода следует объяснить именно тем сильным взаимодействием, которое осуществляется между странами и сообществами в системе человечества. Это приводит к синхронизации перехода в различных регионах и к обострению переходов. Это явление хорошо известно в нелинейной физике [7]. В этом также можно видеть подтверждение существенно нелинейного поведения населения Земли как системы.

Действительно, демографический переход необычайно резок, и его характерное время уже намного меньше средней продолжительности жизни, достигающей в развитых странах 70 лет. Именно ударность, неравновесность этого перехода приводит к нарушению тех длительных, выработанных за тысячелетия нашей истории ценностных и этических представлений общества, устанавливающих преемственность между поколениями. Сегодня принято говорить, что связь времен нарушается и в этом образе следует видеть фундаментальную качественную причину той неустойчивости, следующую из представлений модели, характерный для нашего времени стресс.

Наиболее существен вывод о стабилизации населения мира после демографического перехода. В свете представленной модели это следует из-за перехода от одного типа развития — гиперболического роста в течение эпохи В и завершающегося режимом с обострением — к стабилизированному режиму эпохи С, как следствие тех системных закономерностей, которые лежат в основе моделирования (рис. 8).

Можно сказать, следуя Адаму Смиту, что та невидимая рука самоорганизации, которая направляла рост в течение эпохи В, теперь изменяет нашу траекторию развития. Это существенное предположение собственно следует из математической модели и имеет достаточно глубокие основания в свойствах аналитичности функции $N(T)$ как среднего значения в статистическом ансамбле. В случае человечества речь идет о предсказании перехода системы из одного качественного состояния в другое. Если бы речь шла о продолжении развития по извест-

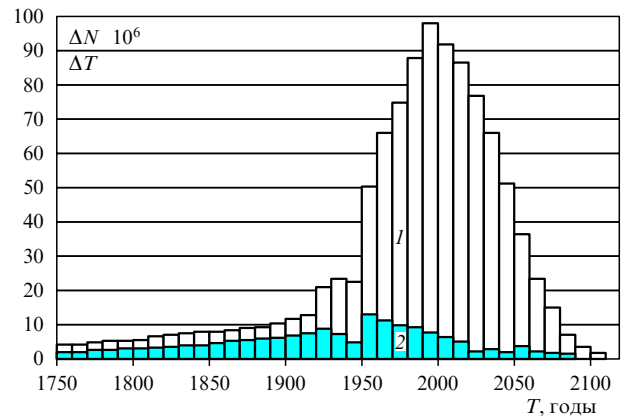


Рис. 8. Демографический переход. Прирост населения мира с 1750 г. по 2100 г. осредненный за декады. 1 — развивающиеся, 2 — развитые страны (по Меррику)

ному пути, без того качественного перехода, который сейчас наступает, то прогноз было бы настолько же проще сделать, но ценность такого предвидения была бы соответственно меньше.

Системные механизмы изменения режима роста при прохождении демографического перехода населения отдельной страны, в которой переход представлен как движение в фазовой плоскости от одного аттрактора к другому, рассмотрены Вишневым [30] (рис. 9).

В то же время Шене, давший наиболее полное описание демографического перехода, в заключение своей монографии [3] пришел к выводу, что ни один из предложенных механизмов не может объяснить этого явления, понимание которого возможно только при комплексном, интерактивном и системном подходах.

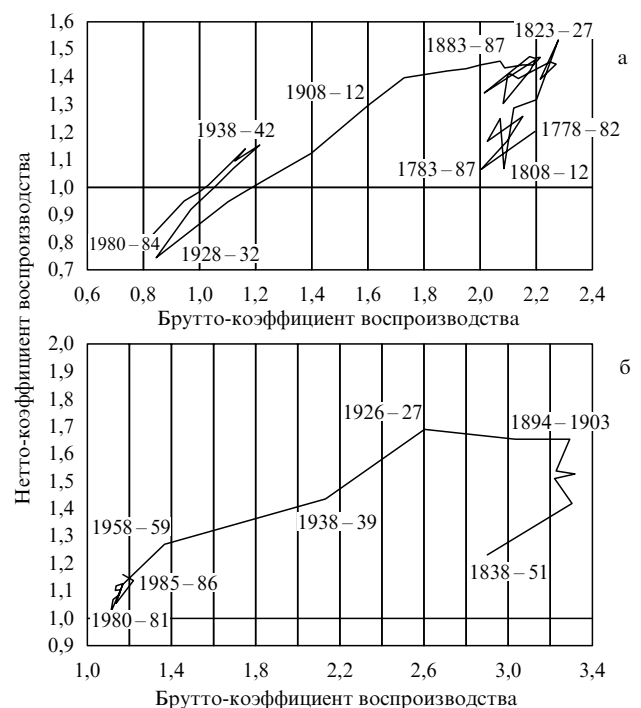


Рис. 9. Фазовая диаграмма развития воспроизводства населения [30]: (а) Швеция (1778–1984 гг.), (б) СССР (1838–1986 гг.)

С точки зрения статистической физики и системного анализа переход напоминает фазовое превращение, которое можно связать с изменением распределения по возрасту. В этом случае кинетику населения мира уже нельзя будет характеризовать только полным числом людей в данный момент $N(T)$, а должно рассматриваться изменение их распределения по возрасту.

Распределение населения по возрасту и полу обычно представляют в виде диаграмм, на которых наглядно видно, как с возрастом изменяется состав населения и как в случае нестационарного состояния происходит эволюция системы. Эти распределения мало менялись на протяжении всей эпохи В и только при прохождении демографического перехода происходит качественное изменение распределения населения по возрасту. От пирамиды, характерной для периода роста, происходит быстрый переход к столбообразному распределению, при котором рост населения практически прекращается (рис. 10).

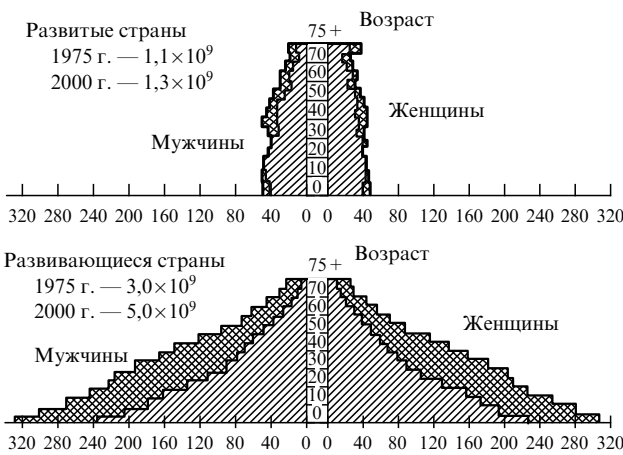


Рис. 10. Распределение населения по возрастам и полу для 1975-го и 2000-го годов по расчетам Национального бюро переписей США. Для 2000 г. дан средний вариант

Для расчета этих изменений пригодны обычные методы демографии, позволяющие прогнозировать развитие на 2–3 поколения вперед [31, 32]. Однако эволюция распределений по возрасту в переходный период должна быть учтена при развитии модели.

7. Трансформация темпов развития во времени

Существенное свойство модели — это изменение масштаба исторического времени, происходящее по мере роста человечества. Преобразование времени и его уплотнение хорошо видно на логарифмической шкале по мере приближения к критической дате $T_1 = 2007$ год. Такую трансформацию легко представить математически, если ввести понятие о мгновенном времени T_c экспоненциального роста, рассматривая его в зависимости от времени T . Тогда для эпох В и С получим (ср. (7))

$$T_c = \left(\frac{1}{N} \frac{dN}{dT} \right)^{-1} = \frac{1}{\tau} [(T_1 - T)^2 + \tau^2] \operatorname{arccotg} \frac{T_1 - T}{\tau} \quad (20)$$

или для прошлого, вдали от перехода

$$T_c(T) \simeq T_1 - T. \quad (21)$$

Поскольку сегодня мы очень близки к T_1 , то T_c просто равно удалению в прошлое. Например, при наступлении эпохи В 1,6 миллиона лет тому назад в начале Палеолита заметное изменение могло произойти только за миллион лет. Такой крайне медленный рост в те далекие времена хорошо известен в антропологии, однако удовлетворительного объяснения он не имел. Отметим, что в то время значительны были и флуктуации населения [25].

К концу Каменного века существенным временем перемен в истории человечества была Неолитическая революция. Ее наступление близко к $T_* = 11\,000$ лет тому назад — моменту, когда по логарифмической шкале прошла половина времени роста человечества и к этому времени прожила половина людей, когда-либо живших $P_{0,1}$ (17). В рамках данной модели рассматривается осредненная картина, поэтому эффекта Неолитической революции (как скачка в развитии) нет. К этому времени скорость прироста была в 10 000 раз выше, чем в начале Палеолита, а население мира приблизилось к 15 миллионам, что близко к оценкам [5].

Преобразования масштаба времени, по существу, есть кинематическое свойство модели, отвечающее кинетике гиперболического роста. В настоящее время по мере приближения к T_1 величина T_c уже отстает от линейной зависимости и ее следует рассчитывать по точной формуле (20). Таким образом, $T_c = 58$ проходит через свое минимальное значение, соответствующее указанному выше среднегодовому росту в 1,7 % и времени удвоения $T_2 = 0,7T_c = 40$ годам. Это подчеркивает, насколько стремительно человечество проходит через критический период; при стабилизации численности населения T_c станет быстро расти как $T_c \simeq (T - T_1)^2 / \tau$ при $T > T_1$ (рис. 11).

Логарифмическое преобразование времени поучительно применить к периодизации истории и крупных исторических событий (табл. 4). Так, история Древнего Египта охватывает три тысячелетия и завершилась 2700 лет тому назад. Следуя Гиббону [33], упадок Римской

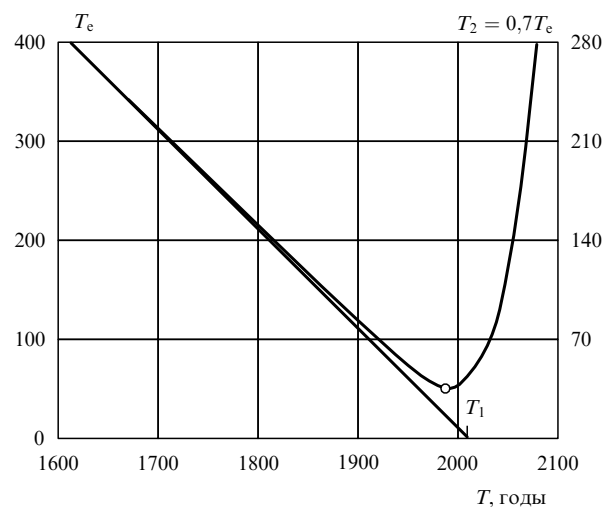


Рис. 11. Зависимость мгновенного времени экспоненциального роста T_c от T

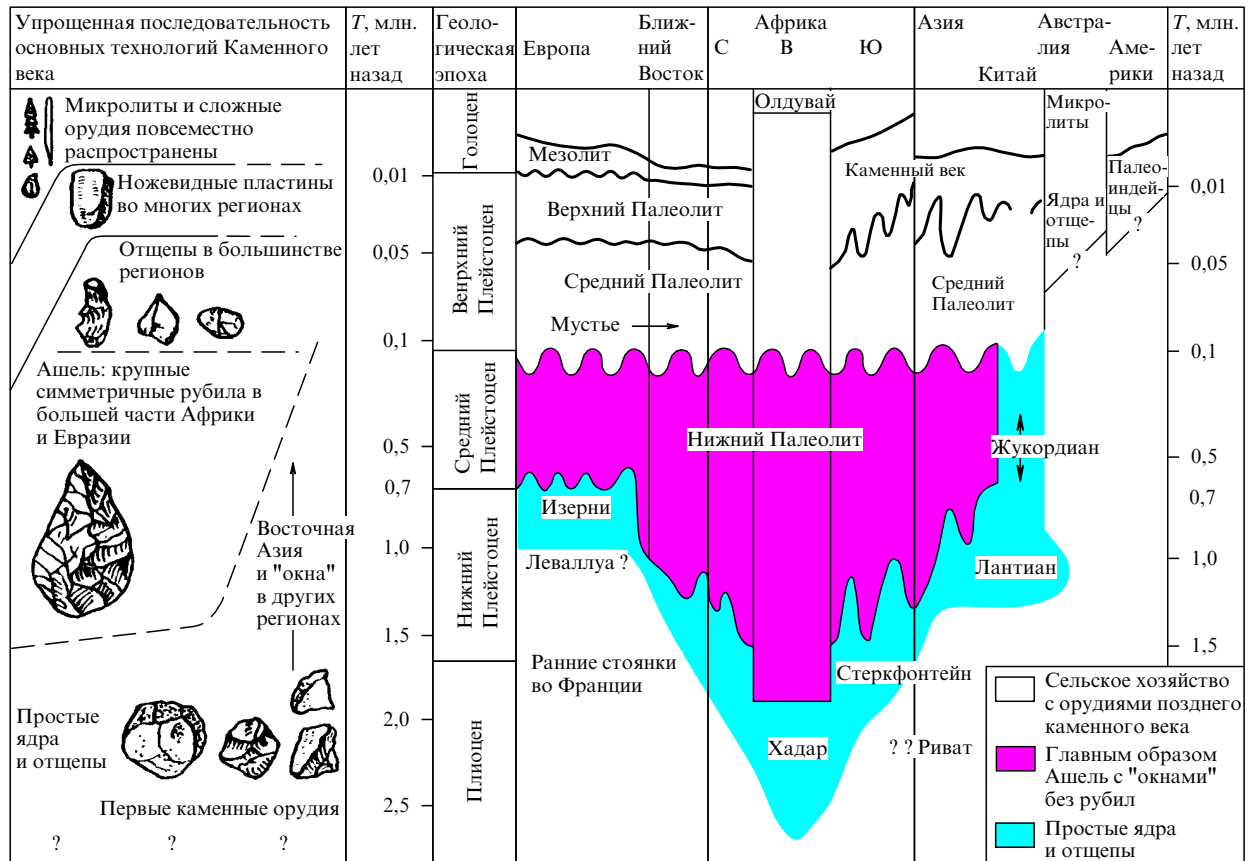


Рис. 12. Стадии Палеолита (Кембриджская энциклопедия эволюции человека [5])

империи продолжался 1,5 тысячи лет, в то время как нынешние империи создавались за века и распадаются за десятилетия (рис. 12).

Растяжение и сжатие времени лучше всего видно, если известные исторические периоды представить в логарифмическом масштабе. Опыт антропологов и традиции историков четко намечают рубежи эпох, равномерно разделяющие в логарифмическом масштабе время от $T_0 = 4,4$ миллиона лет тому назад до $T_1 = 2007$. При этом следует иметь в виду, что сами границы исторических периодов, а тем более доисторических, невозможно установить со сколько-нибудь значительной точностью. Этому мешает как некоторая субъективность определения границ периодов, так и то, что переходы в разных регионах происходили не точно синхронно. Тем не менее эти эмпирически установленные периоды замечательным образом ложатся на логарифмическую шкалу на всем протяжении развития человечества. Более того, с той точностью, которую можно ожидать, эта периодизация соответствует тому, что каждый цикл короче в 2,5–3 раза предшествующего цикла и ведет к увеличению численности во столько же раз. Цикличность такой геометрической прогрессии времен может быть представлена как последовательность интервалов

$$\Delta T(\theta) = K\tau e^{-\theta}, \quad (22)$$

где θ — целая часть $\ln t' = \ln |t - t_0|$ и номер периода, начиная с $\theta = 0$ до $\theta = 11 = \ln K$, предположив, что сокращение каждого следующего цикла происходит в

$e = 2,72$ раза. Тогда продолжительность нулевого периода $\Delta T_A = K\tau = 2,8$ млн. лет и для времени развития получим (см. (10))

$$T_1 - T_0 = K\tau \sum_0^{\ln K} e^{-\theta} = \frac{e}{e-1} K\tau = 1,582 K\tau. \quad (23)$$

Эта оценка продолжительности развития близка к значению $T_1 - T_0 = \pi K\tau/2 = 1,571 K\tau$, полученному выше (16). Небольшое расхождение связано с разными оценками длительности нулевого цикла — эпохи А.

Таким образом, в каждый из 11 периодов эпохи В жило по $\Delta P = 2K^2 = 9$ миллиардов людей, тогда как сама продолжительность циклов изменялась от 1 миллиона до 42 лет, а 9 миллиардов выступает как инвариантный период системного роста общего числа людей. Так, самоподобие развития человечества проявляется на новом уровне скейлинга, в масштабировании хронологии и численности циклов социально-экономического и технологического роста, которыми отмечены выделенные этапы. Отмеченную периодичность формально можно связать с тем, что $P_B(t') = K^2 \ln t'$ периодически в комплексной области, если приписать P фазу, однако смысл ее не вполне ясен. С другой стороны, экспоненциальная последовательность циклов соответствует тому, что можно ожидать для нарастающего ряда бифуркаций, но в представленном уравнении роста (16) такого рода неустойчивостей не должно быть.

Для Каменного века видно не только подтверждение отмеченной цикличности, но и общая одновременность

Таблица 4. Развитие человечества в логарифмическом масштабе. Оледенения: 1 — Вюрм 10–54 тыс. лет, 2 — Рисс 200–250 тыс. лет, 3 — Миндель 400–500 тыс. лет, 4 — Гюнц 600–800 тыс. лет, 5 — Дунай 800–2000 тыс. лет. Последние данные указывают на более сложную последовательность оледенений [5]. Заметим, что для далекого прошлого оценки численности известны только по порядку величин, тогда как датировка известна сравнительно лучше.

Геология		Демография и антропология							История и техника	
Период	Период оледенения	Эпоха	Век	θ	T (даты)	N	Период	ΔT (годы)		
Г О Л О Ц Е Н	1	С	И С Т О Р И Я		2175	13×10^9	Стабилизация	125	Переход к 14×10^9 человек, изменение возрастного состава, урбанизация ← T_1 ← настоящее время компьютеры мировые войны электрэнергия промышленная революция французская революция, великие географические открытия, книгопечатание Падение Рима ← Рождество Христово Гречия, Будда, письменность	
					2050	$10,5 \times 10^9$				
					2007	7×10^9	Мировой демографический переход	42		
				11	1965	$3,5 \times 10^9$				
					1840		Новейшая	125		
					1500	10^9	Новая	340		
					500 н.э.		Средние века	1000		
		В		7	2000 до н.э.	10^8	Древний мир	2500		
				6	9000 до н.э.		Неолит	7000		
			К А М Е Н Н Ы Й В Е К		5	29000	10^7	Мезолит		20000
					4	80000		Мустье		51000
					3	220000	10^6	Ашель		140000
					2	600000		Шельль		380000
					1	1600000	10^5	Олдувай		1000000
А		0	4400000	(1)		2800000	Отделение гоминид от гоминоидов в Африке			
П Л Е Й С Т О Ц Е Н	2 3 4 5								Египет, Китай, Индия Одомашнивание животных Керамика, бронза микролиты Заселение Америки <i>Homo Sapiens</i> речь, овладение огнем Заселение Европы, Азии Рубила <i>Homo Habilis</i>	

перехода от одного цикла к следующему. Вопрос о синхронности мирового исторического процесса давно находится в центре внимания исторической науки [34]. Особенно интересна недавняя монография Дьяконова [35], четко указавшего и на экспоненциальное сокращение исторического времени. Одновременность переходов обязана в первую очередь взаимодействию в системе населения мира, и наблюдаемая синхронность есть сильный довод в пользу развитого системного подхода к глобальной эволюции человечества.

Отмеченные даты переходов обычно связывают с первыми проявлениями новой технологии или социального переустройства, а по мере дальнейшего развития происходит распространение новых признаков в следующий цикл. На такую периодичность крупных социально-технологических циклов впервые внимание было обращено в 1928 г. Н.Д. Кондратьевым [36]. Однако для гиперболического роста периодичность реализуется только в логарифмическом представлении развития, но охватывает уже всю историю человечества.

Из концепции модели следует, что в тех случаях, когда наступал длительный разрыв в популяциях, то в мировом сообществе происходило замедление развития в тех анклавах, которые надолго отделялись от основной массы человечества. В антропологии хорошо известно, что изоляция малых групп приводит к замедлению эволюции общества, а в древних изолятах и сегодня можно найти сообщества, находящиеся на неолитической и даже палеолитической стадии развития. Задержка произошла и с доколумбовой Америкой, длительное время развивающейся самостоятельно, но, будучи надолго оторванной от Евразийского массива, она неминуемо отстала от процесса развития мировой цивилизации.

8. Устойчивость развития

Большой интерес представляет анализ устойчивости процесса роста. Если мы обратимся к критериям устойчивости системы по Ляпунову [8], рассматривая ее поведение при малом возмущении $\delta n = \delta n_0 \exp \lambda t$, то, используя (14), для показателя роста неустойчивости получим

$$\lambda = \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{dn}{dt} \right) = \sin 2 \frac{n}{K}. \quad (24)$$

Таким образом, от T_0 до T_1 рост по этому критерию неустойчив и при $n = \pi K/4$ (т.е. в 1965 г.) или $t = -1$ достигает $\lambda_{\max} = 1$. Только после $T_1 = 2007$ г. и перемене знака λ рост становится системно устойчивым. Этот максимум неустойчивости очень близок к событиям первой и второй мировых войн и, по существу, отвечает ожидаемой неустойчивости в подсистеме так называемых развитых стран (см. рис. 8, раздел 6).

Системная устойчивость развития человечества во время переходного периода с конкретно-исторической точки зрения имеет исключительное значение. Действительно, при демографическом переходе на его первой стадии происходит внезапное появление молодого и активного поколения. Так было в развитых странах — в первую очередь в XIX в. в Европе, когда Европа проходила через этот этап. Тогда возникли демографические предпосылки как для стремительного экономического роста, так и для тех мощных волн эмиграции, которые привели к заселению Нового Света, Сибири и Австралии.

Кейнс [40], быть может, первым обратил внимание на роль демографического фактора в дестабилизации мира, как результат стремительного роста населения и экономики Западной Европы, в первую очередь Германии, а затем России и Японии. Это развитие сопровождалось уходом населения из сел в города и было важным фактором в системной дестабилизации мира перед мировыми войнами XX в. Подобная потеря устойчивости связана с общим свойством систем, проходящих через резкое изменение состояния, когда стабилизирующие факторы, обеспечивающие устойчивость роста, не успевают реализоваться. Именно это выражено в критерии Ляпунова, когда при наступлении демографического перехода изменение скорости роста системы достигает своего максимума.

В настоящее время возможна подобная потеря системной устойчивости при прохождении развиваю-

щихся стран через демографический переход — переход, который произойдет в 2 раза быстрее, чем в Европе, и охватит в 15 раз больше людей. Здесь, в первую очередь, следует обратить внимание на современное развитие Китая и Индии, которые именно в силу стремительности роста могут привести к потере глобальной системной устойчивости. Такие возможные неустойчивости принципиально нельзя предсказать, однако указать на их вероятность не только возможно, но и следует сделать. Именно в сохранении устойчивости развития состоит главная ответственность мирового сообщества: сохранить мир в эпоху крутых перемен и не дать местным конфликтам разгореться в пожар, подобный тому, что возник в Европе в начале XX в.

Без такой глобальной устойчивости невозможно решение всех других глобальных проблем, как бы значимы они ни казались. Поэтому при обсуждении глобальных вопросов безопасности, наряду с военной, экономической и экологической безопасностью, следует включить в анализ, причем далеко не на последнем месте, *демографический фактор* безопасности и стабильности мира, учитывать не только количественные и динамические параметры роста населения, но и качественные, в том числе, этнические факторы.

Тем не менее как наличие достаточно регулярных периодических циклов, так и четко выраженная устойчивость к таким сильным возмущениям, как пандемия чумы, приведшая к потере 30÷40 % населения Европы в XIV в. [5] и тем же мировым войнам, унесшим 10 % населения мира в XX в., показывает, что глобальное развитие устойчиво, поскольку быстро восстанавливается общий процесс роста и видно устойчивое развитие на протяжении всех циклов, указанных выше.

Одним из стабилизирующих факторов, по-видимому, является установление пространственного распределения населения. На основании представлений о динамике систем следует предположить, что расселение народов будет оказывать демпфирующее влияние на нестабильности роста. Это следует и из того, что добавление к кинетическому уравнению роста пространственного диффузионного члена $\nabla^2 N$ приведет к стабилизации роста системы, поскольку собственные значения лапласиана отрицательны [17]. Однако вопрос о системной стабильности роста требует более подробного изучения с учетом роли флуктуаций.

Грубая оценка флуктуаций в системе населения мира предложена в [9]. В относительной мере флуктуации возрастают по мере приближения к рубежу эпохи А и В, а в абсолютной степени — по мере роста человечества, и в наше время могут достигать

$$\delta N = \sqrt{KN} \simeq 20 \times 10^6. \quad (25)$$

Пространственное распределение народонаселения мира в масштабе региона, страны или городов крайне неравномерно и имеет выраженный фрактальный характер. Так, детальное исследование распределения населения Франции недавно произвел Ле Бра, обращаясь к мультифрактальному методу [37]. Для распределения численности населения городов мира $U(R)$ в зависимости от ранга R можно предложить выражение

$$U(R) = \frac{U_0 \ln U_0}{R + \ln U_0}, \quad (26)$$

которое переходит при $R > \ln U_0$ во фрактальное, гиперболическое распределение, а при $R \rightarrow 0$ — в распределение, ограниченное численностью населения самого крупного города мира U_0 .

Интегрируя (26) в пределах от $R = 0$ до $R_{\max} = U_0 \ln U_0$ при $U_{\min} = 1$, то для всего населения мира получим $N = U_0 \ln^2 U_0$, что дает возможность по N найти U_0 и $U(R)$. Таким образом, не вводя никаких новых параметров, удается вполне удовлетворительно, несмотря на трудности в определении численности населения городов, описать ранжировку городов мира в настоящем и прошлом [38, 43]. Так, при Р.Х., приняв $N \sim 200$ миллионов, то для населения Древнего Рима, где один Колизей вмещал 50 000 зрителей, получим $U_0 \sim 1$ миллиона, что соответствует оценкам историков. Заметим, что отношение $U_0/N = 1/\ln^2 U_0 \simeq 0,4\%$ мало меняется для городов рассматриваемых в модели масштабов.

Очевидно, что (26) не применимо для отдельных стран, где фрактальные распределения реализуются только асимптотически, исключив крупные города [39]. Введенную оценку U_0 можно связать с тем, что $\ln U_0$ есть естественный логарифмический масштаб, мера при скейлинге системы населенных пунктов Земли, что связано с представлением об асимптотической ковариантности, предложенного Баренблатом [51]. Таким образом, сделанные оценки служат доводом в пользу статистического системного подхода к населению мира, принятого в данной работе. В рамках полной теории такие распределения следует получить как следствие автомодельности развития и промежуточной асимптотики во времени и пространстве в самоорганизующихся системах (рис. 13).

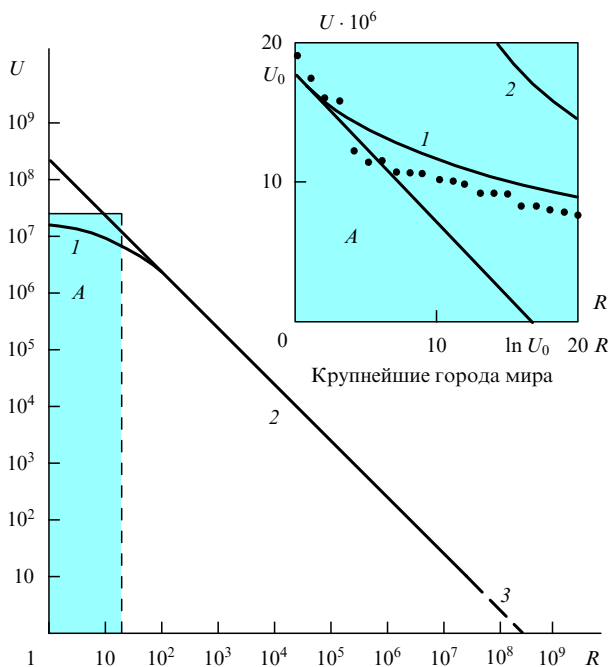


Рис. 13. Распределение городов мира по населению (1995 г.) 1 — $U(R)$, 2 — $U(R) = (U_0 \ln U_0)/R = (290 \times 10^6)/R$ при $R > \ln U_0 = 16,67$, 3 — БОМЖ.и. На врезке А отмечена точками численность населения крупнейших городов мира в линейном масштабе начиная с Токио (точка при $R = 0$), далее по порядку: 1 — Мексико Сити, 2 — Сан Пауло, 3 — Нью Йорк, 4 — Шанхай, 5 — Калькутта, 6 — Буэнос Айрес, 7 — Рио де Жанейро, 8 — Лондон, 9 — Сеул, 10 — Бомбей, 11 — Лос Анжелес, 12 — Осака, 13 — Пекин, 14 — Москва, 15 — Париж, 16 — Джакарта, 17 — Тианин, 18 — Каир, 19 — Тегеран, 20 — Дели

Заметим, что распределение доходов населения также может быть представлено степенным законом Парето. Как указал Скеррот [40], рекурсивный характер большинства социальных явлений лежит в основе тех механизмов, которые приводят к сильным корреляциям по времени и пространству и затем выражаются в самоподобном развитии, столь характерном для социальных явлений.

Таким образом, в истории человечества мы сталкиваемся как с автомодельностью, так и с иерархией неустойчивостей разного масштаба. Однако глобально развитая модель указывает на устойчивость этого процесса в рамках целостного развития человечества.

9. Влияние окружающей среды

В представленной периодизации, даже не обращая к формальным выводам моделирования, видно, как в настоящее время происходит завершение целой эпохи роста и смена парадигмы развития человечества. Мы видим, что на всем протяжении развитие человечества можно рассматривать как единую и открытую систему. Открытость системы означает, что внешние ресурсы не оказывают прямого влияния на рост и его предел.

Таким образом, управление ростом населения определяется внутренними, системными факторами развития, факторами, постоянно действующими на протяжении более чем миллиона лет и адекватно описываемыми математической моделью. Действительно, на всем пути роста человечество в целом всегда располагало достаточными ресурсами для развития, и их человек осваивал, расселяясь по Земле и увеличивая эффективность производства. Тогда же, когда контактов, местных ресурсов и пространства не было, развитие кончалось, однако в среднем рост был неуклонным. С каждым циклом роста все меньше усилий шло на обеспечение пищей, все больше на развитие. Наконец, сегодня в развитых странах $3 \div 4\%$ населения может прокормить всю страну. По утверждению экспертов Международной организации питания и в настоящее время также есть достаточно пространства и ресурсов на планете для принципиальной возможности обеспечить питанием 20–25 миллиардов человек. Распространенным является утверждение о том, что демографический переход определяется исчерпанием ресурсов. Однако растет число указаний на то, что именно системные процессы эволюции дают ключ к пониманию причин перехода, а наивный мальтузианский подход не способен объяснить это явление, имеющее такое значение в наше время [41]. Так, недавно на ряде убедительных примеров Ле Бра показал, что наступление демографического перехода нельзя механистически объяснить перенаселением и отсутствием ресурсов [43]. До сих пор и в обозримом будущем такие ресурсы будут иметься и позволят пройти через демографический переход, при котором население мира асимптотически увеличится всего в 2,5 раза — от 5,7 миллиардов на 1995 г. к 14 миллиардам. Таким образом, вывод, к которому приводит развитая модель, состоит в общей независимости глобального роста от внешних ресурсов, вывод, находящийся в противоречии с общепринятыми и традиционными представлениями о близком исчерпании ресурсов.

Вывод о независимости от глобальных ресурсов можно сформулировать как принцип *демографического*

императива, как следствие имманентности системного роста человечества, проявляющееся на протяжении практически всего времени его эволюции и самоорганизации. Наличие таких общих предпосылок роста не означает, что локально в перенаселенных городах и странах местные ресурсы не исчерпаны или близки к исчерпанию, что только подчеркивает необходимость развития. В прошлом в результате таких условий наступала миграция населения, и так заселялись и осваивались новые земли. Тем не менее распределение населения на Земле крайне неравномерно, и можно ставить вопрос, чем именно, какими системными факторами это определяется. Так, во время расцвета Древнего Рима его население достигало 1 миллиона — до 1 % всего населения мира в ту пору концентрировалось в одном великом городе, в то время, когда обширные пространства были мало обитаемы. Площадь Индии всего на 30 % больше Аргентины, однако население субконтинента в 30 раз больше, чем у Аргентины, которая по утверждению экспертов, в принципе, могла бы прокормить весь мир.

Развитому в модели системному подходу противостоят неомальтузианские концепции Медоузов, представленные в "Пределах роста" [44]. В их исследованиях и моделях, особенно в последней книге [44], совершенно догматически утверждается, что основной процесс — это экспоненциальный рост, утверждение, находящееся в противоречии со всеми данными взятыми за достаточно долгое время. В заключение заметим, что в настоящее время Римский клуб отошел от тех предельных редуционистских позиций, которые характерны для его первого доклада в сторону более интегративного подхода [45], приведшего к интересному и обобщенному взгляду на судьбы человечества, изложенному в последнем докладе Кинга и Шнейдера [46].

В рамках подобных исследований станет вопрос о путях развития в обозримом будущем. Если в прошлом все выражалось в количественном росте, то в новых условиях при стабилизации численности населения критерием развития, по-видимому, станет *качество* населения. Так, за изменением возрастной структуры населения следует глубокая перестройка ценностных ориентаций в обществе, большая нагрузка на здравоохранение, систему социальной защиты и образования. Очень существен вопрос о неравномерности развития и распределения богатства при переходе к стабилизированному населению мира, каким будет асимптотическое состояние мирового сообщества и насколько это состояние будет устойчиво.

10. Заключение и выводы

Для населения мира развитый подход позволяет охватить громадный диапазон времени и круг явлений, в которые входит, по существу, вся история человечества. Постоянство и инвариантность автомодельного процесса, для которого устанавливаются естественные границы его применимости, представляется основным результатом модели, использующей только самые необходимые и минимальные средства для своего построения.

Модель предлагает феноменологическое, макроскопическое описание явлений и не может претендовать на объяснение конкретных деталей механизмов, приводящих к росту, развитию, парадоксально оказывающихся не связанными с непосредственным влиянием

внешних ресурсов на рост. По существу, четко выявленное кооперативное взаимодействие стало определяющим при построении теории. Это и есть тот механизм, о котором в конечном итоге идет речь.

Справедливость принципов моделирования следует видеть не только в том, насколько близко расчет совпадает с наблюдаемыми данными, сколько в следствиях тех основных предположений о системности и стационарности процесса устойчивого автомодельного роста, которые положены в основу теории. Именно в этом представляется успех применения методов нелинейной механики, развитых в значительной мере Хакеном и Пригожиным в системном подходе и приложенных к анализу роста населения Земли [47]. Охватывая такой большой промежуток времени и численности, следует иметь в виду, что по самому свойству нелинейности модели ее нельзя непосредственно применять к отдельным регионам и странам.

Существенным выводом теории стало представление о преобразовании эффективной продолжительности исторического времени по мере самоускоренного роста человечества. Установление рубежа, от которого следует отсчитывать время, масштаб которого увеличивается по мере удаления в прошлое, отвечает представлениям историков и антропологов о периодизации развития и придает их интуитивным представлениям количественный смысл.

Анализ показывает, что человечество ныне проходит критическую эпоху смены парадигм развития, никогда прежде не переживаемую. Некоторые историки сейчас провозгласили конец истории [48]. Однако теперь наступил конец гораздо более обширной эпохи, а критические годы перехода оказались сжатыми в исключительно короткие сроки, свидетелями и участниками которых мы стали [49].

В данном исследовании демографическому фактору придается первостепенное значение. Приходится отметить, что в дискуссиях по глобальной проблематике до последнего времени демографический подход, по существу, отсутствует и по политическим мотивам под давлением некоторых великих держав был исключен из обсуждения. В настоящее время это положение изменилось [50]. В силу указанных причин и тех острых дискуссий и выводов, которые делаются на основе представлений о предвидимом будущем, следует считать целесообразной постановку междисциплинарных комплексных исследований этих проблем, где математическое моделирование должно участвовать вместе с другими методами в анализе роста численности населения мира и тех последствий, которые этот рост будет иметь.

Трудно думать, что можно сознательно в обозримом будущем воздействовать на этот процесс в силу масштаба происходящего и темпов этих событий, само понимание которых еще не полно. Если развитая модель поможет пониманию и даст возможность предложить некоторую общую для человечества канву его развития и перспективу времени, картину пригодную для антропологии и демографии, социологии и истории, а медикам и политикам увидеть системные предпосылки нынешнего переходного периода, как источника стрессов для отдельного человека и критического состояния для мирового сообщества, то автор будет считать опыт этого междисциплинарного исследования оправданным.

В заключение автор выражает свою благодарность Г.И. Баренблату, А.Г. Вишневному, Н.Н. Воронцову, А.В. Гапонову-Грехову, О.Г. Газенко, В.Л. Гинзбургу, В.Я. Гольдину, А.А. Гончару, Б.Б. Кадомцеву, С.П. Курдюмову, Н. Кейфицу, Л.П. Питаевскому, И.Р. Пригожину, Ф. Моррисону и Б. Хессу, а также членам Римского клуба за полезные дискуссии и поддержку этой работы. На разных этапах эта работа поддерживалась Мировым институтом наук, ЮНЕСКО, АЕН РФ, Лондонским Королевским обществом и фондами Сороса и INTAS.

Список литературы

1. Вишневикий А Г *Воспроизводство населения и общество* (М.: Финансы и статистика, 1982)
2. Ehrlich A, Ehrlich P *The Population Explosion* (London: Arrow Books, 1991)
3. Chesnais J-C *The Demographic Transition* (Oxford: Oxford Univ. Press, 1992)
4. Сови А *Общая теория населения* Т. 1, 2 (М.: Прогресс, 1977)
5. The Cambridge Encyclopedia of Human Evolution (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994)
6. Воронцов Н Н *Природа* (2) 79 (1973)
7. Николис Г, Пригожин И Р *Самоорганизация в неравновесных системах* (М.: Мир, 1984)
8. Хакен Г *Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах* (М.: Мир, 1985)
9. Капица С П *Математическое моделирование* 4 (6) 65 (1992)
10. Kapitzka S P "World population growth as a scaling phenomenon and the population explosion", in *Climate Change and Energy Policy* (Eds L Rosen, R Glasser) (New York: AIP, 1992)
11. Kapitzka S P "The population imperative and population explosion", *Proceedings of 42 Pugwash Conference on Science and World Affairs, Berlin, 1992* (Singapore: World Science, 1994) p. 822
12. Капица С П *Успехи физиологических наук* 26 (3) 1995
13. Haberl H, Aubaur H P *Simulation of human population dynamics by a hyperlogistic time-delay equation* (University of Vienna, Institute für Zoologie, preprint, 1991)
14. Tuckel H C *Nature* 359 200 (1992); Monro J *Nature* 363 215 (1993)
15. Foerster, von H et al. *Science* 132 1291 (1960)
16. Hoerner, von S J. *of British Interplanetary Society* 28 691 (1975)
17. Курдюмов С П и др. *Квазилинейные уравнения теплопроводности с источником: обострение, локализация, симметрия, точные решения, асимптотики, структуры*, в сб. *Итоги науки. Современные проблемы математики* 28 (М.: ВИНТИ, 1987)
18. Kurdiunov S P *Intern. Journal of Modern Physics* 1 (4) 299 (1990)
19. Баренблат Г И *Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика* 2-е изд. (Ленинград: Гидрометиздат, 1982)
20. Weiss K M *Human biology* 56 637 (1984)
21. Keyfitz N *Applied Mathematical Demography* (New York: Wiley, 1977)
22. Wood B *Nature* 355 783 (1992)
23. Coppens Y *Personal communication* (1991)
24. Хрисанфова Е Н, Перевозчиков И В *Антропология* (М.: Изд. МГУ, 1991)
25. Фоули Р *Еще один неповторимый вид* (М.: Мир, 1990)
26. Biraben J-N "Essai sur l'évolution du nombre des hommes", in *Population* (1) 13 (1979)
27. *Long range world population projections. Two centuries of population growth 1950–2150* (New York: UN, 1992)
28. Arizpe L, Constanza R, Lutz W, in *An agenda of science for environment and development into 21-st century* (Eds J C I Dooge et al.) (Cambridge: ICSU, CUP, 1992)
29. Садык Н *Народонаселение мира* (М.: ЮФПЛА, Прогресс, 1990)
30. Vishnevsky A "Demographic revolution and the future of fertility: a systems approach", in *Future demographic trends* (Ed. W Lutz) (New York: Academic Press, 1979)
31. Keyfitz N, Flieger W *World Population Growth and Aging* (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1990)
32. *Population situation in 1991 with special emphasis on age structure* (New York: UN, 1991)
33. Гиббон Э *История упадка и разрушения Римской империи* (М., 1883) [Перевод В Неведомского]
34. Конрад Н И *Запад и Восток* 2-е изд. (М.: Изд. Восточной литературы, 1972)
35. Дьяконов И М *Пути Истории (От древнейшего человека до наших дней)* (М.: Изд. Восточной литературы, 1994)
36. Кондратьев Н Д *Проблемы экономической динамики* (М.: Экономика, 1989)
37. Le Bras H *La planete au village* (Paris: Datar, 1993)
38. Трубников О *Природа* (11) 3 1993
39. The prospects of world urbanization, UN, 1987
40. Scarrott G G *Some consequences of recursion in human affairs, IEE Proc.* 129 A (1) 66 (1982)
41. Кейнс Дж М *Экономические последствия Версальского мирного договора* (М., 1922)
42. McLaren D *Are there limits to population and technology?* (Ottawa: R.S.of Canada, 1992)
43. Le Bras H "The myth of overpopulation" *Projection* (7/8) 83 (1992)
44. Meadows D et al. *Limits to growth* (New York, 1972); *Beyond limits* (Toronto, 1992)
45. Mesarovic M, Pestel E *Mankind at the turning point* (New York: Dutton, 1974)
46. Кинг А, Шнейдер Б *Первая глобальная революция* (М.: Прогресс, 1992)
47. Курдюмов С П, Князева Е Н "Синергетическое видение мира: режимы с обострением", в сб. *Самоорганизация и наука* (М.: РАН, 1994)
48. Фукуяма Ф *Вопросы философии* (4) 1992
49. Kapitzka S P "The impact of the demographic transition", in *Overcoming indifference. Ten key challenges in today's world* (Ed. K Schwab) (New York: New York Univ. Press, 1994)
50. Gore A *Earth in balance ecology and the human spirit* (New York: Houghton Mifflin, 1992)
51. Barenblatt G J, Goldenfeld N *Does fully developed turbulence exist? Reynolds number independence versus asymptotic covariance* TAM Report No. 796 (UILV-ENG-95-6018, 1995)

PHENOMENOLOGICAL THEORY OF WORLD POPULATION GROWTH

S.P. Kapitza

*P.L. Kapitza Institute for Physical Problems, Russian Academy of Sciences,
Vorobiovskoye shosse 2, 117334 Moscow, Russia
Tel. (7-095) 137-65 77. Fax (7-095) 938-20 30
E-mail: sergey@kapitza.ras.ru, kapitza@magnit.msk.su*

Of all global problems world population growth is the most significant one. Demographic data describe this process in a concise and quantitative way in its past and present. By analyzing this development it is possible by applying the concepts of systems analysis and synergetics, to work out a mathematical model for a phenomenological description of the global demographic process and to project its trends into the future. Assuming selfsimilarity as the dynamic principle of development, growth can be described practically over the whole of human history, assuming the growth rate to be proportional to the square of the number of people. The large parameter of the theory and the effective size of a coherent population group is of the order of 10^5 and the microscopic parameter of the phenomenology is the human lifespan. The demographic transition — a transition to a stabilized world population of some 14 billion in the foreseeable future — is a systemic singularity and is determined by the inherent pattern of growth of an open system, rather than by the lack of resources. The development of a quantitative nonlinear theory of the world population is of interest for interdisciplinary research in anthropology and demography, history and sociology, for population genetics and epidemiology, for studies in evolution of humankind and the origin of man. The model also provides insight into the stability of growth and the present predicament of humankind, and provides a setting for discussing the main global problems.

PACS numbers: **01.75. + m**
Bibliography — 51 references

Received 15 May 1995, expanded 27 July 1995

ВНИМАНИЮ ЗАРУБЕЖНЫХ ЧИТАТЕЛЕЙ ЖУРНАЛА "Успехи физических наук"

По вопросам подписки обращаться по электронному адресу ufn@ufn.ioc.ac.ru

Распространением журнала на русском языке в зарубежных странах занимается Акционерное общество "Международная книга" через своих контрагентов в соответствующих странах. Укажем для справки адреса ряда фирм-агентов, осуществляющих подписку на журнал "Успехи физических наук":

BRD

Kubon & Sagner
Hebstrabe, 39/41
D-8032 München 34
Postfach 340108

DENMARK

Sputnik International
Boghandel og Forlag
Vester Voldgade 11
1552 Copenhagen K

ICELAND

"MIR" – Society
Vatnsstigur 10
101 Reykjavik

ESPAÑA

Libreria Rubinos
Alcala 98
Madrid 28009

ITALIA

1. Liberia Italia – Russia
Via Edilio Raggio, 1–10
16124 Genova
2. Libreria Edizioni
Estere (EDEST)
Via Cairoli, 12/4
16124 Genova

NETHERLANDS

1. Swets Zeitlinger B.V.
Heereweg 347
P.O. Box 830
2160 SZ Lisse
2. Pegasus
Export Department,
P.O. Box 59687
Leidsestraat 25
1040 LD Amsterdam

FINLAND

Akateeminen Kirja Kauppa Oy
Subscription Department
P.O. Box 218
SF-00511 Helsinki

FRANCE

Librairie du Globe
2, Rue de Buci
75006 – Paris

SWEDEN

Wennergren-Williams AB
Subscription Department
P.O. Box 1305
S-171 25 Solna

SCHWEIZ

1. Pinkus Genossenschaft
Froschaugasse 7
8025, Zurich 1.
2. Cobram,
Rue Louis Favre 37
1201 Geneve

CANADA

1. Ukrainska knyha
962 Bloor Street West
Toronto, Ontario, Canada
M6H 1L6
2. Troyka Ltd
799-College Street
Toronto, Ontario, Canada
M6G 1C7

USA

1. Victor Kamkin Bookstore,
4956 Boiling Brook Parkway
Rockville, MD. 20852
2. Znanie Book Store
5237 Geary Boulevard
San Francisco, Calif. 94118

JAPAN

1. Nauka, Ltd
2-30-19, Minami-Ikebukuro,
Toshima-ku, Tokyo 171
2. Nisso-tosho, Ltd
1-5-16, Suido, Bunkyo-ku,
Tokyo, 112

ISRAEL

"Lepac" Ltd
15, Rambam Street
P.O. Box 1136
Tel-Aviv, 61010

POLSKA

1. "ORPAN" PAN, PKIN
00-901 Warszawa
2. "RUCH" Spolka Akcyjna
Ul. Towarowa, 28
SKR. Pocz. 12 00 958, Wars-
zawa

CZECH REPUBLIC

"Artia Pegas press"
Ve Smeckach, 30
11127 Praha

CHINA

China National Publications
Import-Export Corp.
P.O. Box 88,
E. Road, Chaoyang Distric,
Beijing
100704, China

Адреса всех фирм-агентов Вы можете узнать в А/О "Международная книга":

117049. Россия, Москва, улица Большая Якиманка, 39

телефон: (7-095) 238-49-67, 238-49-30, 238-40-77 телефонфакс: (7-095) 238-46-34, телекс: 411160.

Индекс журнала "Успехи физических наук" — 71004, периодичность — 12 выпусков в год. Цена за год, включая стоимость авиадоставки, — 283 долл. США. Подписку можно оформить начиная с любого номера.