

ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ГЛОБАЛЬНУЮ ДЕМОГРАФИЧЕСКУЮ ДИНАМИКУ

Б.М. Долгоносов

ВВЕДЕНИЕ

Развитие человеческой цивилизации на современном этапе характеризуется взрывным ростом, в результате которого численность населения за вторую половину XX века увеличилась более чем в два раза. В обозримом будущем численность может, по разным оценкам, достичь уровня от 7 до 14 млрд. чел. Удержится ли этот уровень или численность начнет снижаться зависит от способности цивилизации обеспечить благоприятные условия своего существования. В связи с этим, насущной проблемой для судьбы человечества становится выявление законов развития цивилизации в надежде, что эти знания смогут повлиять на ход дальнейшего развития. Глубокий анализ современного состояния проблемы дан в работах (Коротаев и др., 2007а,б). Там же предложена модель глобальной демографической динамики, связывающая изменение численности населения с технико-экономическим (мировой ВВП) и культурным (доля грамотного населения) уровнем. Компьютерная симуляция на основе этой модели показывает, что население мира к концу XXI века стабилизируется на уровне 8.5 млрд. чел.

С несколько иных позиций эта проблема рассмотрена в работе (Dolgonosov and Naidepov, 2006), где изучено влияние информационных факторов на глобальную демографическую динамику и показано, что количество накопленных человечеством знаний и скорость их производства решающим образом влияют на численность населения. В настоящей статье внимание фокусируется на более глубоком обосновании ключевых положений информационного подхода к демографической динамике, уточнении соотношений и численных оценок.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Человеческая цивилизация – это открытая эволюционирующая система, наделенная памятью и способная производить знания. Знания понимаются как условная информация, генерируемая в процессе анализа рецептируемой безусловной информации, поступающей в виде сигналов из внешнего мира (Чернавский, 2004). Знания используются для построения

адекватной картины мира, необходимой для выживания цивилизации в изменяющихся условиях. Производство знаний вызывает процессы самоорганизации в обществе, в результате которых цивилизация развивается в направлении увеличения сложности своей структуры. Количество знаний определяет структурную организацию общества и поэтому может служить характеристикой уровня развития цивилизации.

Переход от безусловной информации к условной в процессе производства знаний сопровождается значительным сжатием информации. Примерами могут служить задачи восстановления функций и построения алгоритмов. В первой задаче (Колмогоров, 1956, 1965) количество информации (или ϵ -энтропии – по Колмогорову), необходимое, чтобы с заданной точностью ϵ восстановить функцию из метрического пространства функций, равно логарифму числа элементов минимальной ϵ -сети этого пространства. Второй пример взят из теории алгоритмической сложности (Юдин, 1985), в которой показано, что построение алгоритмов решения задач обеспечивает логарифмическое сжатие информации. Эти примеры дают основание полагать, что логарифмическое сжатие информации – общее свойство интеллектуальной деятельности.

В связи с логарифмическим сжатием информации связь между количеством R безусловной информации о мире и количеством q генерируемой условной информации (знаний) может быть представлена в виде $q = q_c \ln R$, где q_c – коэффициент, зависящий от выбора единиц измерения. Воспользуемся произволом в выборе единиц и положим $q_c = 1$. Тогда указанное соотношение будет выглядеть, как $q = \ln R$. Из него следует, что при данном уровне знаний q человечество способно распознать $R = e^q$ бит безусловной информации. Величина R характеризует кругозор цивилизации, ее способность распознавать поступающие извне сигналы. Используя эту интерпретацию, можно сказать, что рост знаний экспоненциально расширяет кругозор цивилизации. Вместе с ним возрастают возможности в сфере использования и воспроизводства ресурсов, развиваются новые жизнеспасающие технологии.

Условная информация накапливается в разных видах памяти: генетической, нейронной и внешней. Информация, необходимая для приспособления биологического вида к окружающей среде с характерным временем порядка миллиона лет, накапливается в геноме человека. Информация, которая нужна для выживания в быстро меняющихся условиях, запоминается в нейронной памяти. Наряду с этим, информация записывается во внешней памяти, носителями которой являются книги и запоминающие устройства компьютеров.

На раннем этапе биологической эволюции главную роль в накоплении информации играла генетическая память. В последующем процессе становления человека появление язы-

ка способствовало быстрому наращиванию информации в нейронной памяти. Внешняя память в виде книг стала активно использоваться с началом эры книгопечатания. Затем, с переходом к компьютерной эре, внешняя память пополнилась запоминающими устройствами компьютеров, объем памяти которых в настоящее время быстро растет.

Накапливаться может не только условная информация (знания), но и безусловная (рецептируемая) информация. Условная информация обычно записывается в виде текстов, содержащих описания выделенных сущностей и отношений между ними. Безусловная информация может быть представлена образцами исходного материала, фотографиями, аудио- и видеозаписями, временными рядами, данными всевозможных измерений и т.д. Значительная часть внешней памяти, особенно на компьютерных носителях, заполнена именно сырой рецептируемой информацией.

КОЛИЧЕСТВО НАКОПЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Количество информации во внешней памяти можно оценить по объему текстов в библиотечных фондах. К настоящему времени накоплено текстовой информации примерно $R_T \sim 10^{14}$ бит (Анисимов, 2004).

Количество генетической информации можно оценить следующим образом. Длина I_G генетического кода человека $\sim 6 \cdot 10^9$ бит (Льюин, 1987), а при устранении избыточности – на два порядка меньше, т.е. $I_G \sim 10^8$ бит/чел (Анисимов, 2004). Генетическая память разных людей во многом совпадает. Различие в структуре геномов у двух человек, не находящихся в родстве, всего лишь около 0.1%, а размер средней группы живущих родственников $\sim 10^2$ человек, так что доля новой генетической информации составляет $\chi_G \sim 10^{-3} / 10^2 \sim 10^{-5}$. При общей численности населения $N \sim 6 \cdot 10^9$ человек цивилизация содержит генетической информации в размере $R_G = \chi_G I_G N \sim 10^{13}$ бит, что на порядок меньше количества информации во внешней памяти.

Для оценки емкости нейронной памяти человечества учтем, что объем памяти мозга, физически доступный для хранения получаемой из внешнего мира информации, составляет $I_N \sim 10^8 - 10^9$ бит/чел (Горшков, 1996). Нейронная память заполнена преимущественно той общеизвестной бытовой и профессиональной информацией, которой человек чаще пользуется. На уникальные знания приходится лишь малая доля памяти χ_N , которая примерно соответствует доле производителей знаний в обществе. Эта доля составляет $\sim 10^{-4}$, а если исключить повтор информации, то еще на порядок меньше, т.е. $\chi_N \sim 10^{-5}$. При известной числен-

ности человечества N получим следующую оценку объема нейронной памяти:

$R_N = \chi_N I_N N \sim 10^{13}$ бит, – что совпадает с оценкой объема генетической памяти. Примерно такую же оценку нейронной памяти дает Анисимов (2004). Сравнение с количеством информации во внешней памяти показывает, что современное человечество уже не в состоянии удерживать всю информацию в нейронной памяти.

Таким образом, к настоящему времени внешняя память по своему объему примерно на порядок превзошла все другие виды памяти: $R_T \gg R_N \sim R_G$. Она начала быстро расти с возникновением книгопечатания и достигла уровня генетической и нейронной памяти к середине XX века.

Рассмотрим развитие цивилизация на временном интервале, малом по сравнению с эволюционным масштабам времени ($\sim 10^6$ лет). В этом случае можно пренебречь наращиванием генетической памяти и изменением параметров мозга. Исключим из рассмотрения также последний короткий исторический период, когда внешняя память стала соизмерима с другими видами памяти (речь идет о последнем столетии). В рамках определенного таким образом интервала времени выполняется условие $R_T \ll R_N \sim R_G$, т.е. накопление информации идет по каналам генетической и нейронной памяти, поэтому общая память цивилизации (количество накопленной информации) является суммой указанных составляющих:

$R = R_G + R_N = (\chi_G I_G + \chi_N I_N) N$. Характеристики генома и объем мозга в течение этого времени постоянны ($I_G, I_N = \text{const}$), доли уникальной информации также не меняются ($\chi_G, \chi_N = \text{const}$), следовательно, имеет место соотношение $R/N = \text{const}$.

Полученный результат говорит о том, что в отсутствие внешних носителей информации кругозор цивилизации расширяется пропорционально ее численности. Имея в виду причинно-следственные связи, а именно то, что накопление информации первично, а рост численности вторичен, правильнее было бы сформулировать это положение наоборот, а именно: в отсутствие внешних носителей информации численность цивилизации растет пропорционально количеству накопленной информации. Так как накопленная информация R преобразуется в знания q и при этом логарифмически сжимается в соответствии с формулой $R = e^q$, то из соотношения $N \sim R$ получаем

$$N \sim e^q, \quad (1)$$

т.е. численность растет экспоненциально с накоплением знаний. Этот вывод, несмотря на свою кажущуюся парадоксальность, имеет простые причины, которые кроются в том, что накопление знаний сопровождается развитием жизнеспасающих технологий, снижающих смертность.

Подчеркнем, что соотношение (1) справедливо только тогда, когда накопление информации идет по внутренним каналам памяти (нейронному и генетическому). Преобладающая роль этих каналов сохранялась практически всю историю человечества за исключением последнего столетия, когда бóльшая часть информации проходила уже по каналу внешней памяти. Использование внешней памяти приводит к нарушению соотношения (1). Есть и другая причина, по которой режим роста (1) не может длиться вечно, – это ограниченность ресурсов биосферы. Глобальные ресурсные ограничения проявляются при достаточно высокой численности населения и приводят к отставанию роста численности от закона (1). В конечном итоге, должен установиться гомеостазис, при котором численность населения соответствует несущей емкости биосферы.

ПРОИЗВОДСТВО ЗНАНИЙ

Цивилизация генерирует условную информацию в каналах генетической и нейронной памяти. Скорость производства по первому каналу определяется вероятностью возникновения новых комбинаций генов и скоростью размножения людей, а по второму каналу – функциональными возможностями мозга, оснащенного речью и письменностью, а в последнее время также устройствами переработки и хранения информации (компьютеры и их память). Генетический канал работает значительно медленнее, чем нейронный. Об этом можно судить по характерным временам процессов: в первом случае порядка миллиона лет, а во втором, порядка десяти лет. Поскольку мы рассматриваем времена, значительно меньшие эволюционных масштабов, генетический канал можно не рассматривать, а сосредоточиться на производстве знаний по нейронному каналу.

Для нахождения скорости производства знаний будем рассматривать ситуацию в среднем, пренебрегая индивидуальными различиями людей и их неодинаковым участием в этом процессе. Сохранение функциональных характеристик мозга в течение рассматриваемого интервала времени подразумевает, что средняя скорость переработки информации одним человеком (обозначим ее w) не изменяется со временем. Тогда для популяции из N человек общая скорость производства знаний будет равна

$$\dot{q} = wN, \quad (2)$$

где $\dot{q} \equiv dq / dt$.

Связь численности N со скоростью производства знаний \dot{q} имеет принципиальное значение. Мозг непрерывно преобразует рецептируемую безусловную информацию в условную, которая необходима для выработки приспособительных реакций, т.е., в конечном итоге, для выживания. Такая деятельность может прекратиться только со смертью. Поэтому если

производство условной информации обращается в нуль $\dot{q} = 0$, то это свидетельствует о гибели цивилизации, поскольку такая цивилизация не может противостоять возникающим время от времени новым вызовам природы. Таким образом, жизнь не может существовать без производства знаний, а сам факт существования цивилизации всегда означает, что $\dot{q} > 0$.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ДИНАМИКА

Рассмотрим цивилизацию как систему, которая производит знания, необходимые для своего выживания. Эволюция этой системы идет таким образом, чтобы затраты ресурсов были минимальными, т.е. свою деятельность система осуществляет в соответствии с неким принципом наименьшего действия, в котором само действие S описывает интегральные затраты ресурсов на наращивание знаний. Геометрически этот процесс выглядит как перемещение системы по траектории $q(t)$ из фиксированного начального состояния $q(t_1)$ в фиксированное конечное $q(t_2)$, а действие представляет собой функционал траектории $S[q(t)]$. В произвольный момент времени t темп расходования ресурсов задается некой функцией $L(q, \dot{q}, t)$ координаты q (количество знаний) и скорости \dot{q} (скорость производства знаний), которую в механике принято называть функцией Лагранжа (или лагранжианом). В таком случае принцип наименьшего действия можно сформулировать следующим образом:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt \rightarrow \min. \quad (3)$$

Лагранжиан задается неоднозначно: возможно прибавление к лагранжиану полной производной по времени от произвольной функции q и t (Ландау и Лифшиц, 1965).

Приравнивая нулю вариацию действия $\delta S[q(t)] / \delta q(t) = 0$ при фиксированных концах траектории, получим уравнение Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = 0. \quad (4)$$

Рассмотрим развитие одинокой цивилизации. Отсутствие выделенного начала отсчета времени свидетельствует о его однородности, а это означает, что лагранжиан не должен явно зависеть от времени, т.е. $L = L(q, \dot{q})$. Все знания производятся внутри системы, поскольку цивилизация изолирована от внешних источников знаний, которые могли бы производиться другими цивилизациями. Если производство знаний прекращается $\dot{q} = 0$, цивилизация гибнет, а ее лагранжиан вырождается $L(q, 0) = a_0 = \text{const}$, превращая уравнение (4) в тождество.

Поскольку значение $L(q,0)$ конечно, лагранжиан регулярен по второму аргументу в точке $\dot{q} = 0$, а значит, может быть разложен в ряд Тейлора в окрестности этой точки:

$$L(q, \dot{q}) = a_0 + a_1(q)\dot{q} + a_2(q)\dot{q}^2 + \dots$$

Первые два члена в этом разложении могут быть опущены, так как их можно представить в виде полной производной по времени. Содержательная часть разложения начинается с квадратичного члена:

$$L(q, \dot{q}) = a_2(q)\dot{q}^2 + \dots \quad (5)$$

Далее рассмотрим несколько простейших лагранжианов, совместимых с (5) и отражающих разные режимы производства знаний. Для упрощения формул время t приводится к масштабу t_c , характерному для рассматриваемой задачи. Возврат к исходным единицам измерения времени осуществляется заменой $t \rightarrow t/t_c$.

Постоянный режим. Знания производятся с постоянной скоростью: $\dot{q} = \text{const} = v_0$. Согласно (2), этот режим характерен для гомеостатической цивилизации с постоянной численностью. Соотношение (1) в этом случае не действует из-за ресурсных ограничений, препятствующих росту численности населения, а накопление информации идет по каналу внешней памяти. Простейший лагранжиан, приводящий к этому режиму, получается из (5) при условии $a_2(q) = \text{const}$ и имеет вид $L = \dot{q}^2$. Уравнение Лагранжа сводится к $\ddot{q} = 0$. Оно дает линейный рост знаний: $q = q_0 + v_0 t$.

Режим с обострением. Скорость производства знаний экспоненциально растет с их накоплением: $\dot{q} \sim e^q$. Это соотношение прямо следует из уравнений (1) и (2), если исключить из них N . К режиму с обострением приводит лагранжиан вида $L = \dot{q}^2 e^{-2q}$. Соответствующее уравнение Лагранжа

$$\ddot{q} = \dot{q}^2. \quad (6)$$

Здесь присутствует квадратичная нелинейность, которую можно интерпретировать в терминах информационных потоков. Действительно, рассматривая $v \equiv \dot{q}$ как информационный поток, можно сказать, что скорость его роста $\dot{v} = v^2$ обусловлена взаимодействием информационных потоков, циркулирующих в цивилизации.

Решение уравнения Лагранжа при начальных условиях $q(0) = q_0$, $\dot{q}(0) = v_0$ приводит к гиперболическому нарастанию скорости производства знаний: $\dot{q} = (t_1 - t)^{-1}$, где $t_1 = 1/v_0$ — точка сингулярности. Накопление знаний происходит по закону $q = q_0 - \ln(1 - t/t_1)$. Зависимость q и $v = \dot{q}$ от t показана на рис. 1.

Комбинированные режимы. С началом действия глобальных ресурсных ограничений закон (1), а вместе с ним и соотношение $\dot{q} \sim e^q$ нарушаются. Возникают эффекты торможения производства знаний, которые можно описать зависимостью $\dot{q} \sim e^q / [1 + c(q)e^q]$, где $c(q)$ – функция торможения (неотрицательно определенная функция). Вид этой зависимости выбран таким образом, чтобы при $c(q) \rightarrow 0$ получить режим с обострением, а при $q \rightarrow \infty$ и $c(q) \rightarrow \text{const}$ – постоянный режим. Соответствующий лагранжиан имеет вид

$$L = \frac{\dot{q}^2 e^{-2q}}{1 - c(q)\dot{q}}. \quad (7)$$

Уравнение Лагранжа:

$$\ddot{q} = \dot{q}^2 \{1 - \dot{q}[c(q) + c'(q)]\},$$

где $c'(q) \equiv dc(q)/dq$. Вид функции торможения $c(q)$ определяет конкретный режим производства знаний. Далее мы рассмотрим различные комбинированные режимы в порядке нарастания их сложности: от простейшего режима со стабилизацией до наиболее сложного режима затухающих колебаний.

Режим со стабилизацией является комбинацией режима с обострением $\dot{q} \sim e^q$, который реализуется на начальном этапе развития, и постоянного режима $\dot{q} = \text{const}$ – на конечном этапе. Процесс описывается лагранжианом (7) с $c(q) \equiv 1$. Соответствующее уравнение Лагранжа:

$$\ddot{q} = \dot{q}^2 (1 - \dot{q}). \quad (8)$$

Решение показано на рис. 1. Зависимость $v = \dot{q}$ от t монотонно возрастает, стремясь к 1 при $t \rightarrow \infty$.

Режим с возвратом имеет следующие особенности. На начальном этапе процесс идет с обострением. В силу инерции система проскакивает стационарную точку $\dot{q} = \text{const}$, достигает максимальной скорости производства знаний, а затем возвращается назад, приближаясь к стационарному состоянию с постоянным режимом генерации знаний (рис. 1). Лагранжиан задается выражением (7), в котором функция торможения

$$c(q) = 1 - e^{-\alpha q} / (1 - \alpha), \quad \alpha > 0, \quad \alpha \neq 1.$$

В пределе $\alpha \rightarrow 0$ получаем режим с обострением, а при $\alpha \rightarrow \infty$ – режим со стабилизацией. Уравнение Лагранжа:

$$\ddot{q} = \dot{q}^2 [1 - \dot{q}(1 - e^{-\alpha q})]. \quad (9)$$

Колебательный режим описывает повторяющийся процесс возрождения и упадка цивилизации, характеризующийся последовательностью этапов: сначала накопление знаний

в режиме с обострением, достижение максимума скорости производства знаний; затем падение скорости, достижение ее минимума, возврат к режиму с обострением и т.д. В этом случае простейший лагранжиан имеет вид (7) с функцией торможения

$$c(q) = 1 - \frac{\cos \beta q}{\sqrt{1 + \beta^2}}, \quad \beta > 0.$$

В пределе $\beta \rightarrow 0$ возвращаемся к режиму с обострением. Уравнение Лагранжа:

$$\ddot{q} = \dot{q}^2 [1 - \dot{q}(1 - \cos \varphi)], \quad \varphi = \beta q + \arctg \beta.$$

Его решение имеет колебательный характер. На достаточном удалении от начала процесса устанавливается периодический режим с периодом $T = 2\pi/\beta$. Результаты расчетов при начальных условиях $q_0 = 0$ и $v_0 = 0.01$ и разных значениях β представлены на рис. 2. С уменьшением частоты β возрастает период и амплитуда колебаний.

Режим затухающих колебаний отличается от предыдущего режима только наличием затухания, под действием которого со временем устанавливается постоянный режим производства знаний (рис. 3). Лагранжиан имеет вид (7) с функцией торможения

$$c(q) = 1 - \frac{e^{-\alpha q} \cos \beta q}{\sqrt{(1 - \alpha)^2 + \beta^2}}, \quad \alpha > 0, \quad \beta > 0.$$

В пределе $\beta \rightarrow 0$ приходим к режиму с возвратом, а при $\alpha \rightarrow 0$ – к колебательному режиму без затухания. Уравнение Лагранжа:

$$\ddot{q} = \dot{q}^2 [1 - \dot{q}(1 - e^{-\alpha q} \cos \varphi)], \quad \varphi = \beta q + \arctg[\beta/(1 - \alpha)].$$

Инвариантность. Отметим, что уравнение (6) инвариантно относительно преобразования времени $t \rightarrow kt$, где $k > 0$. Тем же свойством обладает уравнение (8), записанное в размерной форме

$$\ddot{q} = \dot{q}^2 (1 - \dot{q}/\dot{q}_{\max}), \quad (10)$$

где $\dot{q}_{\max} = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q}$ – наибольшая скорость производства знаний; выбрав соответствующий масштаб времени t_c , ее можно также записать в виде $\dot{q}_{\max} = 1/t_c$.

Вообще, инвариантными являются все полученные выше уравнения, если вместе с преобразованием времени $t \rightarrow kt$ осуществлять такое же преобразование временного масштаба: $t_c \rightarrow kt_c$. Инвариантность очевидна из общего вида этих уравнений, записанных в размерной форме:

$$\ddot{q} = \dot{q}^2 [1 - \dot{q} t_c f(q)],$$

где f – некоторая функция, определяющая режим производства знаний.

Инвариантность означает, что каждое информационное уравнение будет иметь один и тот же вид в системах координат с разным масштабом времени. Отсюда следует вывод, что независимые цивилизации могут развиваться разными темпами.

ГЛОБАЛЬНАЯ ДЕМОГРАФИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА

Состояние цивилизации можно охарактеризовать тремя факторами: 1) уровнем развития, измеряемым количеством накопленных знаний; 2) численностью населения; 3) эффективностью восстановления окружающей среды.

Рост численности человечества напрямую связан с накоплением знаний, особенно в сфере бизнесберегающих технологий. Знания способствуют росту энергетической мощности глобальной экономики. Вместе с тем, экспансия человечества приводит к обострению экологических проблем и ухудшению условий существования. Это заметно увеличивает стоимость жизни, которая и так растет из-за увеличения затрат на образование, медицину, жилье и т.д. Быстро растущая стоимость жизни способствует снижению рождаемости и падению темпов роста численности населения, особенно по мере того, как достижения цивилизации охватывают все большее число людей, вынуждая их тратить значительные средства на поддержание стандартного уровня жизни.

При растущей численности населения восстановление окружающей среды требует всё больших затрат энергии. Это также способствует росту стоимости жизни. Попытка уменьшить затраты на ремедиацию в надежде на естественный процесс восстановления чревата катастрофическим разрушением среды, которое сделает условия существования невыносимыми для большинства людей, вызовет снижение продолжительности жизни, приведет к острой конкуренции за чистую воду, воздух и ненарушенную среду, станет источником социальных конфликтов. В конечном итоге это также приведет к торможению роста и даже уменьшению численности населения, но в неуправляемом хаотическом режиме. Избежать этого можно, если целевым образом направить необходимое количество энергии на восстановление среды, а также снизить численность населения до разумного уровня, достаточного для сохранения биосферы.

Среди перечисленных выше факторов, характеризующих состояние цивилизации, не все независимы. Как было показано раньше, численность населения зависит от уровня развития цивилизации. К сожалению, этого нельзя сказать об эффективности восстановления среды. Как показывает опыт, накопленные знания слабо влияют на этот фактор, поскольку затрагиваются экономические и политические интересы. Фактор эффективности в значительной степени зависит от монополизации экономики и общественной жизни, от зрелости об-

щества в плане экономических и правовых отношений, от социальной и геополитической структуры мирового сообщества, от уровня военного противостояния и т.д. Поэтому из трех приведенных факторов реально мы имеем только два независимых: уровень развития и эффективность восстановления среды, которые определяют численность человечества. Здесь мы рассмотрим эту проблему более детально и, в частности, покажем, что численность населения определяется не только количеством накопленных знаний, но и скоростью их производства. Будет также изучено влияние эффективности восстановления среды на ход демографического процесса, характер и темп изменения численности населения.

Теоретическое описание роста народонаселения, предпринятое в ряде работ (Капица, 1992, 1996; Подлазов, 2002; Найденов и Кожевникова, 2003; Малков и др., 2007; Коротаяев и др., 2007а,б), показывают, что в ближайшее время следует ожидать прекращения роста и достижения стационарной численности человечества. Весьма вероятен также сценарий последующего снижения численности под действием ряда неблагоприятных факторов (Дольник, 1992; Северцов, 1992; Smail, 2002).

Основное достижение теоретических работ – создание моделей, описывающих динамику численности в современный период. При этом человечество рассматривается как единая популяция, связываемая мощными миграционными, материальными, энергетическими, финансовыми и информационными потоками. Сложность системы, нелинейность связей между частями не позволяет использовать принцип суперпозиции и суммировать вклады отдельных стран и регионов, а приводит к необходимости описывать демографический процесс для человечества в целом (Чернавский, 2004; Ризниченко и Рубин, 2004; Малинецкий и др., 2007).

В работах (von Foerster et al., 1960; von Horner, 1975; Капица, 1992, 1996) было показано, что рост численности N происходит в режиме с обострением по уравнению $\dot{N} \sim N^2$, из которого следует гиперболический закон роста: $N \sim (t_1 - t)^{-1}$. Формально при $t \rightarrow t_1$ численность обращается в бесконечность, что дало повод для названия “the Doomsday model” (модель конца света).

Феноменологическая модель со стабилизацией была предложена в (Найденов и Кожевникова, 2003):

$$\dot{N} = wN^2(1 - N/N_c).$$

Эта модель встречается в популяционной динамике (Свирижев, 1987). Она описывает динамику разреженной популяции, в которой размножение лимитируется образованием брачных пар (Ризниченко и Рубин, 2004). В человеческой популяции квадратичный закон роста имеет не биологическую, а информационную природу.

Модель со стабилизацией характеризуется гиперболическим ростом при $N \ll N_c$, а затем замедлением роста и выходом на асимптотическую стадию с постепенным приближением к предельной численности $N \rightarrow N_c$, которая, по оценкам (Найденков и Кожевникова, 2003), составляет $N_c = 7.4$ млрд. чел. В соответствии с этой моделью, предельная численность будет достигнута в середине XXI века.

Полученные выше результаты в отношении скорости производства знаний можно перенести на численность населения, имея в виду связь (2). Например, исходя из режима со стабилизацией (10), можно получить уравнение

$$\dot{N} = wN^2(1 - wN / \dot{q}_{\max}).$$

В этом уравнении все коэффициенты имеют информационную природу, а предельная численность населения равна $N_c = \dot{q}_{\max} / w$. Следовательно, определяющую роль в динамике численности населения играют информационные факторы (производительность человека w и наибольшая скорость производства знаний \dot{q}_{\max}), которые, конечно, каким-то образом связаны с биологическими факторами (фертильность, смертность, возрастная структура и т.д.), а также со свойствами среды (биосферы). Информационные факторы выступают здесь в качестве феноменологических коэффициентов (или макропараметров), а биологические играют роль микропараметров. Подобная ситуация имеет место, например, в химической кинетике, где константы скоростей реакций зависят от индивидуальных свойств взаимодействующих молекул и свойств среды. Выявлением этой связи занимается статистическая физика. Что касается зависимости информационных макропараметров от биологических характеристик человека и его среды обитания, то это должно стать предметом изучения статистической экологии.

Режимы роста. Возвратимся к рис. 1 и 2. Согласно (2), поток информации $v = \dot{q}$ можно рассматривать как соответствующим образом нормированную численность N . Принятое в расчетах начальное состояние с $q_0 = 0$ и $0 < v_0 \ll 1$ (см. подпись к рис. 1) описывает идеализированную ситуацию, когда в начальном состоянии нет запаса знаний, а численность населения мала. Рис. 1 показывает, что на ранних стадиях эволюции режимы со стабилизацией и с возвратом практически не отличаются от простейшего режима с обострением.

По мере приближения к точке сингулярности t_1 кривые демонстрируют разное поведение. В режиме с возвратом численность достигает максимума, а затем падает до стационарного уровня. В стационарном состоянии знания производятся с постоянной скоростью, а количество знаний линейно растет со временем.

Рис. 2 демонстрирует сглаженный ход кривой накопления знаний, хотя численность периодически претерпевает катаклизмы, размах и частота которых зависят от параметра β . Важно, чтобы при катаклизмах не уничтожалась информация, иначе последующая эволюция будет стартовать с более низкой позиции. Здесь не обойтись без внешней памяти, иначе невозможно объяснить, как сохраняется информация при падении численности населения. Удивительно, что превалирование внешней памяти как раз происходит при приближении к точке сингулярности и совпадает с началом глобального экологического кризиса. Совпадение двух разных событий: превышение внешней памяти над нейронной и начало экологического кризиса, – по всей видимости, не случайно, а связано с критическим явлением – преодолением порога перколяции (т.е. глобализацией), когда прежде разрозненное человечество приобретает связность, прежде всего, через потоки информации, но кроме того через миграционные, финансовые и материальные потоки. Точнее говоря, связность между разными странами становится сопоставимой по величине со связностью внутри них. Преодоление порога перколяции возможно только в том случае, когда знания могут передаваться по каналам связи без их носителей (т.е. людей), а это требует наличия развитой внешней памяти. Таким образом, создание развитой внешней памяти, глобализация и экологический кризис в планетарном масштабе совпадают по времени.

Рис. 3 показывает эволюцию с затухающими колебаниями. Сначала численность растет в режиме с обострением. По инерции она проходит точку, соответствующую стационарной емкости среды. Рост продолжается еще некоторое время. Из-за избыточной численности популяция разрушает среду обитания. Наступает экологический кризис, в течение которого популяция коллапсирует, ее численность обрушивается до уровня, более низкого, чем стационарная емкость среды. За время коллапса среда постепенно восстанавливается, а вслед за этим возрастает и численность популяции, которая после нескольких колебаний входит в фазу стабилизации. На первых двух графиках первый пик самый крупный, а затем колебания затухают. На последнем графике колебания происходят с более высокой частотой. Здесь первый небольшой пик выступает в роли предвестника последующего катастрофического всплеска численности, продолжающегося несколькими затухающими волнами.

Возможность изменения численности человечества, как на первых двух графиках рис. 3, обсуждалась еще Дольником (1992), который описал различные биологические механизмы регуляции численности вида. В связи с этим можно ожидать, что режим затухающих колебаний наиболее подходит для описания динамики человеческой популяции. Трудность состоит в том, что соответствующая модель содержит, кроме прочих параметров, частоту колебаний β , для нахождения которой нет достаточной эмпирической базы. Поэтому для

описания демографической динамики мы остановились на более простой модели с возвратом, в которой $\beta = 0$.

Основные уравнения. В терминах численности популяции уравнение для режима с возвратом можно записать в виде

$$\dot{N} = wN^2[1 - N/K(q)], \quad (11)$$

где $K(q)$ – мгновенная емкость среды, т.е. наибольшая численность, достижимая при данном уровне знаний q :

$$K(q) = \frac{N_c}{1 - \exp(-\alpha q)}, \quad (12)$$

$N_c = 1/(wt_c)$ – несущая емкость биосферы Земли, которая определяется как стационарная численность человечества, при которой биосфера и цивилизация устойчиво сосуществуют в течение длительного времени. Очевидно, $K(q) \rightarrow \infty$ при $q \rightarrow 0$ и $K(q) \rightarrow N_c$ при $q \rightarrow \infty$. Таким образом, мгновенная емкость среды (12) может существенно превышать ее стационарное значение N_c .

Для замыкания системы (11)–(12) надо использовать уравнение (2).

Мгновенная емкость среды. По своему смыслу мгновенная емкость среды представляет собой отношение общего объема ресурсов R_0 к стандартным потребностям одного человека R_1 , т.е.

$$K = R_0 / R_1.$$

В отличие от популяций животных человек не только использует естественные ресурсы, но и непосредственно участвует в формировании своей ресурсной базы. Реализуется это двумя способами:

- 1) через создание технологий добычи и переработки ресурсов;
- 2) через организацию ресурсных циклов, воспроизводящих ресурсы и восстанавливающих окружающую среду.

Неразвитое общество пользуется, главным образом, естественными ресурсами, одновременно накапливая знания для совершенствования способов добычи и переработки. Вместе с тем, постепенно формируются простейшие ресурсные циклы. Объем используемых ресурсов невелик, и они успевают восстанавливаться естественным путем. При этом общий объем ресурсов практически не изменяется, т.е. $R_0 \approx \text{const}$. Рост знаний q приводит, через создание новых технологий, к пропорциональному увеличению потребностей человека: $R_1 \sim q$. В итоге мгновенная емкость среды, сначала очень большая, постепенно убывает по закону $K \sim 1/q$.

В развитом обществе производство ресурсов R_0 растет в процессе накопления знаний не столько за счет развития технологий, сколько благодаря созданию *ресурсных циклов*, организуя которые «человек всё более взваливает на себя бремя восстановления ресурсной базы, тем самым постоянно отодвигая обусловленный природой предел, но платя за это удорожанием ресурсов» (Люри, 2004). При этом снижается вклад в R_0 естественных ресурсов биосферы. Одновременно с ростом R_0 растут потребности человека R_1 ввиду удорожания ресурсов, увеличения затрат на жилье, медицину, образование и т.д., появления новых товаров и услуг. По достижении стационарной численности населения рост знаний продолжается, поддерживая одновременный рост ресурсов R_0 и потребностей R_1 , так что их отношение остается постоянным: $K = \text{const} = N_c$.

Попытаемся найти из общих соображений зависимость K от q , согласующуюся с описанным качественным поведением емкости среды. Так как вся деятельность человечества по изучению материального мира направлена в конечном итоге на выявление и производство новых ресурсов, их общий объем R_0 будет расти вместе с количеством накопленной информации R по степенному закону $R_0 \sim R^\alpha$, $\alpha \geq 0$, который отражает фрактальный характер использования накопленной информации для производства ресурсов. Так как $R \sim e^q$, то общий объем ресурсов будет расти по закону

$$R_0 = ce^{\alpha q},$$

где $c > 0$. Потребности человека R_1 растут линейно с увеличением общего объема ресурсов:

$$R_1 = a + bR_0, \quad (13)$$

где a и b – постоянные ($b > 0$). Для определения взаимосвязи между параметрами учтем, что человечество, как уже отмечалось, не может существовать без знаний, так как теряется способность ориентироваться в сложном мире. Поэтому в пределе $q \rightarrow 0$ должны исчезать потребности человека $R_1 \rightarrow 0$, а общие ресурсы – стремиться к минимуму $R_0 \rightarrow c$ (остается только то, что есть в природе в готовом виде). Указанные условия в применении к (13) приводят к $a + bc = 0$, или $a = -bc$. Следовательно, (13) можно представить в виде

$$R_1 = bc(e^{\alpha q} - 1).$$

Составляя отношение R_0 / R_1 , найдем мгновенную емкость среды

$$K = \frac{N_c e^{\alpha q}}{e^{\alpha q} - 1}, \quad (14)$$

где учтено, что при безграничном росте знаний K стремится к $N_c = 1/b$. Соотношение (14) полностью совпадает с формулой (12), которая была получена другим способом – из инфор-

мационной динамики. Это служит косвенным подтверждением правильности выбора вида лагранжиана (7) вместе с функцией торможения, соответствующей режиму с возвратом.

Эффективность цивилизации. Рассмотрим поведение цивилизации в следующих характерных ситуациях.

Первая ситуация соответствует *слаборазвитой цивилизации* с малым запасом знаний: $q \ll 1/\alpha$. В этом случае мгновенная емкость среды высока $K(q) \approx N_c / (\alpha q)$, а численность популяции мала $N \ll K(q)$, так что в уравнении (11) можно пренебречь отношением $N/K(q)$ по сравнению с 1 и прийти к режиму с обострением, в котором накопление знаний идет по нейронному каналу. На этом этапе развития мгновенная емкость среды, по существу, безгранична, а популяция характеризуется высокой рождаемостью, высокой смертностью и малой продолжительностью жизни. Подобный способ выживания называется в экологии г-стратегией.

Противоположная ситуация $q \gg 1/\alpha$ характеризует *высокоразвитую цивилизацию* с большим запасом знаний. Емкость среды для нее постоянна $K(q) = N_c$, численность населения достигает стационарного уровня N_c , а накопление знаний идет с постоянной скоростью по каналу внешней памяти. Это состояние можно назвать *гомеостазисом* цивилизации. На данном этапе развития возможности среды полностью исчерпаны, а популяция придерживается так называемой К-стратегии, характеризуемой низкой рождаемостью, низкой смертностью и высокой продолжительностью жизни.

Промежуточная ситуация $q \sim 1/\alpha$, отвечает переходному режиму от г-стратегии к К-стратегии. В этот период численность популяции может намного превысить стационарную численность N_c , чтобы затем, после достижения максимума, опуститься до уровня N_c (накопление знаний при этом переключается с нейронного канала на канал внешней памяти). Чем меньше значение параметра α , тем более опасная перенаселенность, превышающая несущую емкость биосферы, грозит популяции и тем значительнее будет последующий коллапс. Напротив, увеличение α уменьшает высоту максимума, который вообще исчезает при $\alpha \approx 1$. С дальнейшим ростом α динамика численности переходит в режим со стабилизацией, при котором численность растет монотонно до уровня плато N_c .

Таким образом, параметр α характеризует способность цивилизации эффективно восстанавливать окружающую среду, применяя для этого разные средства, в том числе добиваясь снижения темпов роста и даже уменьшения численности населения до приемлемого уровня (конечно, за счет больших затрат энергии). Чем меньше эффективность α этой дея-

тельности, тем с более страшными катаклизмами столкнется цивилизация в переходный период, среди которых перенаселенность, войны, пандемии и разрушение биосферы.

Возникает вопрос, насколько политическая воля и общественное сознание определяют эффективность цивилизации. «Если это в известной мере верно для индивидуума, в меньшей степени применимо для стран, то можно думать, что на уровне всего человечества наше влияние и политическая воля менее всего эффективны» (Капица и др., 2003).

Эти соображения, подкрепленные анализом биологических механизмов регуляции численности (Дольник, 1992), говорят о том, что эффективность α – вполне объективная феноменологическая характеристика цивилизации, зависящая от социальной и геополитической структуры мирового сообщества, от наличия и возможностей инфраструктуры глобального управления, но не зависящая от политической воли.

Альтернативная формулировка демографической динамики. Важно отметить, что демографическая динамика, описываемая уравнениями (2), (11) и (12), может быть переформулирована исключительно в терминах численности населения N и емкости среды K без упоминания количества знаний q , накопленного цивилизацией. Действительно, дифференцируя соотношение (12) по времени и используя (2), нетрудно получить уравнение для K :

$$dK / dt = \alpha w N K (1 - K / N_c). \quad (15)$$

Вместе с уравнением (11) для N , записанным в виде

$$dN / dt = w N^2 (1 - N / K), \quad (16)$$

получаем замкнутую систему (15)–(16) для описания демографической динамики.

Уравнение (15) имеет вполне естественную интерпретацию, в соответствии с которой скорость изменения емкости среды пропорциональна:

- 1) самой емкости (т.е. наличному объему ресурсов);
- 2) численности населения, которое использует и воспроизводит ресурсы;
- 3) отклонению емкости от своего равновесного значения N_c .

Используя уравнение (15), можно по-новому взглянуть на физический смысл параметра α , который, как отмечалось выше, характеризует эффективность восстановления окружающей среды. Запишем w в виде $w = (N_c t_c)^{-1}$. Из (16) следует, что t_c – характерное время роста численности. Тогда в (15) появляется новый масштаб времени $t_K = \alpha^{-1} t_c$, который можно интерпретировать как характерное время восстановления биосферы. Очевидно, α^{-1} есть фактор запаздывания реакции биосферы на развитие демографической ситуации. Чем больше α^{-1} , тем большее время займет восстановление. Этот процесс включает в себя самоочищение окружающей среды вместе с естественной сукцессией в нарушенных экосистемах (хотя не факт, что система вернется со временем в прежнее состояние (Svirezhev and Svirezhev

jeva-Hopkins, 1998)), а также усилия самой цивилизации по восстановлению среды обитания, требующие затрат энергии, сравнимых с полной мощностью цивилизации, которая составляет сейчас около 20 ТВт. Увеличение энергетических субсидий на эти цели приведет к уменьшению фактора запаздывания. Сказанное означает, что α включает в себя вклад естественных процессов в биосфере α_B и вклад цивилизации α_C , пропорциональный затратам энергии на восстановление среды, так что $\alpha = \alpha_B + \alpha_C$. Человечество в принципе может управлять своим вкладом α_C и, тем самым, изменять фактор запаздывания в нужную сторону. Увеличение α_C приведет, очевидно, к более быстрому эффекту восстановления. Это подтверждает другую интерпретацию α – как меры эффективности восстановления биосферы. В настоящее время разрушение окружающей среды зашло так далеко, что возможности биосферы по самовосстановлению уже исчерпаны (Данилов-Данильян и Лосев, 2000). Если даже прекратить вмешательство человека, процесс восстановления займет очень много времени по меркам демографической динамики. В этих условиях для поддержания своего существования цивилизация вынуждена тратить большие ресурсы на восстановление среды. Формально это означает, что $\alpha_C \gg \alpha_B$, и, следовательно, общая эффективность α сводится по существу к вкладу цивилизации: $\alpha \approx \alpha_C$. К сожалению, принципиальная способность человечества управлять величиной α_C в действительности не реализуется. Напротив, практически всё, что делается, подчинено краткосрочным целям, направленным на обеспечение лучшей жизни, не считаясь с ограниченностью ресурсов планеты. Это недальновидное поведение ускоряет и усугубляет разрушение биосферы и конечное падение человечества. Все большее понимание находит мысль, высказанная еще Ж.Б. Ламарком («человеку суждено истребить самого себя после того, как он сделает Землю непригодной для обитания»), что наша цивилизация идет по пути саморазрушения и катастрофы (Сперри, 1994; Данилов-Данильян и Лосев, 2000).

Калибровка модели и сценарии роста. Описание демографических данных производилось на основе модели для режима с возвратом, который включает в себя в качестве предельного случая $\alpha \rightarrow \infty$ режим со стабилизацией. Использовались уравнения (11)–(12) вместе с (2), дополненные начальными условиями: $N(0) = N_0$ и $q(0) = q_0$. Рассматривались два варианта калибровки:

- 1) по демографическим данным за период 1950 – 2004 гг.,
- 2) с привлечением более ранних, хотя и менее точных, данных, включая и палеодемографические оценки.

Вариант 1. Использовались демографические данные (Total Midyear Population, 2005). Уравнения модели содержат 5 параметров: $t_c, N_c, N_0, q_0, \alpha$. Значение параметра N_0 соответствует численности человечества в 1950 г. Остальные 4 параметра находились методом наименьших квадратов:

$$s^2(p) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [N_i - N(t_i; p)]^2 \rightarrow \min_p, \quad (17)$$

где s – среднеквадратичное отклонение теоретической зависимости от демографических данных, N_i – значения численности в моменты времени t_i , n – размер выборки, p – совокупность калибровочных параметров. Результаты калибровки представлены в табл. 1, а рассчитанные сценарии – на рис. 4.

Таблица 1. Результаты калибровки модели за период 1950 – 2004 гг.

№ сценария	t_c , лет	N_c , млрд.чел.	$w^{-1} = N_c t_c$, млрд.чел.год	α	q_0	N_{\max} , млрд.чел.	t_m , год	s , млн.чел.
1a	13.2	7.4	97.3	∞	0	7.4	∞	16.2
1b	13.1	7.5	98.1	0.954	15.2	7.5	∞	16.1
2	19.5	5.4	105	0.114	9.0	7.0	2030	19.0
3	36.9	2.8	104	0.0261	16.0	7.0	2028	18.9

N_{\max} – максимальная численность, а t_m – момент ее достижения.

Сценарий 1a получен для режима со стабилизацией, которому соответствует $\alpha \rightarrow \infty$, а значение q_0 может быть любым, так как в уравнение (8) q не входит. Сценарии 1b, 2, 3 отвечают режиму с возвратом. Сценарии 1a и 1b близки между собой, но существенно отличаются от сценариев 2 и 3. Однако произведение $N_c t_c$ изменяется незначительно: 101 ± 4 млрд.чел.год.

Ошибка демографических данных оценивается в 3–5% (Keyfitz, 1971), что в абсолютных величинах составляет 200–300 млн. чел. от современной численности населения (6.5 млрд. чел.). Разброс относительно среднего составит половину от этого количества, т.е. 100–150 млн. чел. Считая, что последние значения составляют $3s_d$ (где s_d – среднеквадратичная ошибка демографических данных), получим оценку $s_d = 30$ –50 млн. чел.

Приведенные в табл. 1 значения s примерно в 2–2.5 раза меньше s_d , т.е. точность модели выше точности демографических данных. По этой причине невозможно отдать предпочтение какому-то одному из представленных сценариев.

На рис. 4 представлены различные сценарии изменения численности человечества. Сценарии 1a и 1b предсказывают стабилизацию численности населения в середине текущего века на уровне соответственно 7.4–7.5 млрд. чел.

Согласно сценарию 2 в 2030 г. будет достигнут максимум в 7 млрд. чел., а затем примерно в течение трех веков численность будет снижаться до уровня 5.4 млрд. чел.

Сценарий 3 дает максимум 7 млрд. чел. в 2028 г., что близко к прогнозу по сценарию 2, однако последующее снижение численности будет более глубоким (до 2.8 млрд. чел.) и более продолжительным (примерно в течение тысячи лет).

В этом варианте калибровки модель показывает широкий спектр возможностей дальнейшего хода численности. Наилучшее приближение к демографическим данным за период 1950–2004 гг. обеспечивают сценарии с менее интенсивным ростом, чем принято считать, и даже с возвратом к меньшей численности.

Вариант 2. Использовались данные из работ (Biraben, 1979; Jones et al., 1994; Total Midyear Population, 2005), охватывающие значительно больший интервал времени, чем в предыдущем варианте калибровки. Отсчет времени начинается от момента $t_0 = -1.6$ млн. лет, когда сформировался вид *Homo habilis*. Его численность N_0 в то время составляла порядка 100 тыс. чел. Последующий рост происходил в режиме с обострением, для которого ранее (von Hoerner, 1975) было найдено значение $w^{-1} = N_c t_c = 200$ млрд. чел-год. Расчет с этим значением w дает $N_0 = 125$ тыс. чел. в согласии с общепринятыми оценками. Количество знаний в те времена было весьма мало, а возможности окружающей среды практически безграничны, т.е. формально $q_0 = 0$, а $K(q_0) = \infty$. Дальнейший ход численности показан на рис. 5 прямой линией. Видно, что режим с обострением действовал до последней четверти XX века. С этого времени начинается переходный период, в течение которого темп роста снижается. Далее ожидается, что численность либо стабилизируется на определенном уровне, либо достигнет максимума и снизится до более низкого уровня. В расчетах мы рассматривали сценарии с разной продолжительностью переходного периода t_c – от 20 до 2000 лет. Во всех сценариях параметр w имеет одно и то же значение. Стационарная численность вычисляется по формуле $N_c = (wt_c)^{-1}$. Параметр α находится методом наименьших квадратов (17). Результаты калибровки представлены в табл. 2. Динамика численности в переходный период показана в общих чертах на рис. 5 и более подробно – на рис. 6.

Таблица 2. Результаты калибровки модели по расширенным данным

№ сценария	t_c , лет	N_c , млрд.чел.	α	N_{max} , млрд.чел.	t_m , год	s , млн.чел.
1	20	10	1.81	10	∞	102.6
2	25	8	1.28	8.27	2049	91.5
3	30	6.67	1.02	7.67	2033	88.6
4	40	5	0.709	7.25	2025	83.1
5	60	3.33	0.442	7.00	2020	78.5
6	100	2	0.251	6.87	2017	75.2
7	2000	0.1	0.0118	6.71	2014	71.4

Прежде всего, отметим очевидное отклонение режима с обострением от демографических данных при приближении к точке сингулярности (уходящая вверх кривая на рис. 6). Дальнейшее развитие неоднозначно. Имеющимся демографическим данным не противоречат сценарии развития с разными значениями эффективности α . При высоких α численность населения монотонно растет, достигая насыщения (как в сценарии 1). С уменьшением α численность достигает максимума, а затем падает до некоторого уровня N_c . Этот уровень связан с параметром α , как показано на рис. 7. В интервале $\alpha = 0-1$ эмпирические данные хорошо описываются регрессией $N_c = 8.346\alpha - 1.766\alpha^2$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.999$. Таким образом, несущая емкость биосферы N_c возрастает с ростом эффективности α восстановления окружающей среды.

При малых α велика разница между максимальной численностью цивилизации N_{max} и ее стационарным уровнем N_c (см. табл. 2). Вблизи точки максимума t_m планета сильно перенаселена, несущая емкость биосферы значительно превышена, и результатом становится драматическое падение численности.

Иная ситуация при больших α . Промежуточный максимум отсутствует (он отодвигается на бесконечность и сливается со стационарным уровнем), а численность населения постепенно дорастает до несущей емкости биосферы.

Таким образом, эффективность α показывает, насколько глобальная демографическая динамика согласована с возможностями биосферы. С величиной α связана эффективность самой цивилизации, ее способность реально оценить ситуацию, выделить достаточные энергетические ресурсы на восстановление биосферы, вовремя погасить инерцию роста численности, а затем уменьшить ее до приемлемого уровня. Чем меньше эффективность α , тем

с более страшными катаклизмами столкнется цивилизация в переходный период, среди которых перенаселенность, пандемии, войны и разрушение биосферы.

Среднеквадратичное отклонение s расчетных кривых от демографических данных зависит от α , как показано на рис. 7. Для сценариев 1–7, изображенных на рис. 5 и 6, величина s находится в пределах 70–100 млн. чел., что заметно меньше ошибки самих демографических данных, составляющей 200–300 млн. чел. Таким образом, как и в первом варианте калибровки, мы не можем отдать предпочтение какому-либо сценарию из представленных на рис. 6.

Рассмотрим крайние сценарии.

Сценарий 1 близок к официальному прогнозу ООН (World population prospects, 2005), согласно которому численность населения возрастет до 9.1 млрд. чел. к середине текущего века и продолжит увеличиваться дальше.

Сценарий 7 дает максимум численности в 6.7 млрд. чел., достигаемый в 2014 г. (см. табл. 2). После этого идет снижение численности, сначала быстрое, а затем медленное, в течение примерно 2000 лет.

Для ограничения числа возможных сценариев необходимо использовать независимые оценки стационарного уровня N_c . В настоящее время человечество потребляет по оценкам (Vitousek et al., 1986; Горшков, 1995) около 20% планетарной биомассы (в энергетическом эквиваленте), тогда как допустимое изъятие, не разрушающее биосферу, не превышает 1% (Горшков, 1995). То же можно сказать и об антропогенном тепловыделении, которое составляет 15–23% от производства энергии всей биосферой при допустимом пороге в 1%. Таким образом, человечество уже примерно в 20 раз превысило допустимый предел мощности своей экономики и вышло за пределы устойчивости биосферы.

Возврат к разумному хозяйствованию возможен только при снижении на порядок численности населения (Горшков, 1995; Поляков, 2002). Для реализации других способов снижения потребления уже не осталось времени из-за быстрого разрушения окружающей среды. Сегодня человечество достигло уровня 6.5 млрд. чел. Исходя из этого, получаем интервальную оценку $N_c \sim 0.1–1$ млрд. чел., что находится между сценариями 6 и 7 (см. табл. 2 и рис. 6). Таким образом, возможен вариант, когда численность населения достигнет максимума около 7 млрд. чел. в 2014–2017 гг. Затем пойдет быстрый спад численности до уровня 5.1–5.6 млрд. чел. к 2050 г. и далее до уровня 3.4–4.1 млрд. чел. к 2100 г. (это близко к прогнозу Форрестера (Forrester, 1971), полученному на основе его модели мировой динамики). Последующая более медленная стабилизация численности может занять от сотен до тысяч лет.

Общее обсуждение результатов расчетов. Полученные результаты качественно согласуются с соображениями Смейла (Smail, 2002) о том, что существует конечный (не очень высокий) предел роста численности, более того, что этот предел скоро будет достигнут и что стабилизация численности и даже ее значительное уменьшение не только весьма желательны, но и, скорее всего, неизбежны. Предполагаемое значительное уменьшение численности является следствием более чем векового периода взрывного роста, в результате которого, как показывают многие признаки, долговременная оптимальная несущая емкость биосферы Земли уже сильно превышена. По оценкам (Smail, 2002) стационарная емкость биосферы не выше 2–3 млрд. чел., а достигнута она будет не ранее чем через два столетия.

Как уже отмечалось выше, целенаправленный контроль численности весьма проблематичен. Однако со временем (примерно через два поколения) должны проявиться биологические и социальные механизмы снижения рождаемости, которые во многих развивающихся странах еще не действуют (Дольник, 1992). Этот процесс займет как минимум полвека, за которые численность возрастет по инерции до 9–10 млрд. чел. (Smail, 2002). Расчеты показывают, что такое поведение возможно. Между тем, другие сценарии не исключают более быстрого торможения роста с последующим снижением численности. Все эти сценарии в той или иной степени удовлетворяют демографическим данным на интервале 1950–2004 гг., но дают существенное расхождение в недалеком будущем. Причина связана с самим характером демографического процесса. Дело в том, что в условиях высокой перенаселенности велика вероятность потери устойчивости цивилизацией, и вместо естественного, хотя и медленного, роста, а затем снижения численности начнется неуправляемый коллапс в хаотическом режиме, который в действительности означает пандемии, нехватку ресурсов, социальные катаклизмы, разрушение биосферы. Таким образом, с той или иной вероятностью возможны разные сценарии. Разработанная модель показывает, какие это сценарии, но не может ответить на вопрос, какова вероятность реализации каждого из них. Для нахождения таких вероятностей надо использовать не детерминистские, а стохастические модели.

Информационный императив. Человечество почти до конца XX века развивалось в режиме с обострением. По мере приближения к точке сингулярности вступают в игру тормозящие рост факторы, а режим с обострением сменяется режимом с ограниченным ростом (стабилизация, возврат или колебания). Такую смену режимов принято называть демографическим переходом. Во всех сценариях с ограниченным ростом (кроме колебательного) численность человечества со временем достигает некоего постоянного уровня, при котором рождаемость равна смертности, а разрушающее воздействие на биосферу удается скомпенсировать. Для стабильного существования человечества приходится практически все ресурсы (за исключением небольшой их части, идущей на потребление) тратить на восстановление ок-

ружающей среды (Люри, 2004). Такая ситуация характерна для зрелой, гомеостатической, цивилизации.

В работе (Капица, 1996) сформулирован демографический императив, в соответствии с которым крупномасштабные социальные, исторические, экономические и культурные процессы подстраиваются к изменению численности народонаселения N . Эта величина играет роль ведущей медленной переменной, называемой в синергетике параметром порядка.

В информационной парадигме роль параметра порядка переходит к количеству знаний q . Действительно, интегрирование в (3) при нахождении q сглаживает резкие изменения N , что особенно заметно в периоды обострений, когда N растет значительно быстрее, чем q (рис. 2).

Более медленное изменение q по сравнению с N говорит о том, что демографический императив следует дополнить *информационным императивом*, в соответствии с которым *глобальные демографические процессы подстраиваются под изменение количества накопленных человечеством знаний*.

Таким образом, знания выступают в качестве единственной движущей силы развития цивилизации. Происходит это следующим образом. Накопление знаний способствует развитию жизнеспасающих технологий (Подлазов, 2002), которые приводят к улучшению качества жизни (жилье, питание, медицина, образование и др.). В результате снижается детская смертность, повышается защищенность всех возрастов, что ведет к увеличению средней продолжительности жизни и численности населения. С 1955 по 2005 гг. продолжительность жизни в мире в целом возросла с 47 до 65 лет. В развитых странах Европы и Северной Америки – с 65 до 76 (World population prospects, 2005). Увеличение продолжительности жизни и улучшение образования приводят к повышению скорости производства знаний. В итоге получаем замкнутый цикл: накопленные знания → жизнеспасающие технологии → рост продолжительности жизни, улучшение образования → рост производства новых знаний. Этот цикл обеспечивает нелинейный, самоускоряющийся характер процесса производства знаний.

Важная особенность процесса – это неустойчивость его начального состояния. Вообще, достаточно сложная система, в которой не производится условная информация, оказывается структурно неустойчивой. Сколь угодно малое проявление самоорганизации в такой системе становится началом развития процесса с обострением, который сопровождается становлением цивилизации. В этом смысле возникновение цивилизации закономерно, несмотря на возможную случайность появления первой самоорганизующейся флуктуации. Это согласуется с взглядами Тейяра де Шардена (2001), который постулировал появление разума в больших сложных системах.

ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЙ РОСТ КАК СЛЕДСТВИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ

Рассмотрим систему, находящуюся в устойчивом состоянии. Изменение параметров с течением времени постепенно приводит систему на грань устойчивости. Последующая за этим потеря устойчивости и переход к новому устойчивому состоянию может проявляться на начальном этапе перехода как гиперболический рост типа того, что наблюдается в глобальной демографической динамике.

Продемонстрируем этот эффект на примере потенциальной системы, описываемой уравнением

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{dV(x)}{dx}, \quad (18)$$

где x - параметр порядка системы, $V(x)$ - потенциал. Равновесные точки системы находятся из условия $dV(x)/dx = 0$.

Пусть система имеет три или более равновесных точек x_i , по крайней мере две из которых устойчивы. В этом случае можно записать $V'(x) = k(x)(x - x_1)(x - x_2)(x - x_3)$, где $x_1 < x_2 < x_3$; корни x_1 и x_3 отвечают устойчивым состояниям, а x_2 - неустойчивому; между x_1 , x_2 и x_3 нет других корней (эта ситуация изображена на рис. 8). Функция $k(x)$ включает зависимость от других корней; пусть $k(x) > 0$ по крайней мере в интервале между двумя устойчивыми точками $x_1 \leq x \leq x_3$. Корни x_i зависят от параметров потенциала. Положим, параметры потенциала изменяются таким образом, что глубина потенциальной ямы x_1 уменьшается, так что точки x_1 и x_2 в конечном итоге сливаются (рис. 8). В этом состоянии уравнение (18) можно представить в виде

$$dy/dt = \tilde{k}(y)y^2(a - y),$$

где $y = x - x_1$, $a = x_3 - x_1 > 0$; $\tilde{k}(y) = k(x_1 + y) > 0$ при $0 \leq y \leq a$. Тогда при $y > 0$ в достаточно малой окрестности точки $y = 0$ уравнение принимает вид

$$dy/dt \approx \tilde{k}(0)ay^2.$$

Его решение растет гиперболически. По мере приближения к точке $y = a$ этот закон нарушается.

Применительно к росту популяции, переменная y представляет собой численность, параметр a - несущую емкость среды, а $\tilde{k}(0)a$ - коэффициент роста.

Таким образом, гиперболический закон роста численности человечества обусловлен потерей устойчивости исходного состояния $y = 0$ вследствие изменения параметров системы, в данном случае за счет накопления условной информации.

Последнее замечание, касающееся накопления информации, имеет общий характер. Динамика с обострением получается, если в изучаемой системе накапливается некоторая величина. В космологии – это гравитирующая масса, в динамике цивилизации – количество знаний, при землетрясениях – напряжения в земной коре (индикаторы – выделение газообразного гелия или повышение концентрации ионов хлора в воде), в финансовой динамике – денежная масса на рынке (индикатор – индекс Доу-Джонса), при речных паводках – масса накопленной воды в речном бассейне, в модели песчаной кучи – угол наклона ее поверхности.

РЕЖИМ С ОБОСТРЕНИЕМ ПРИ НАЛИЧИИ ОСЦИЛЛЯЦИЙ

Рассмотрим класс автомодельных лагранжианов вида $L = f(\dot{\varphi}\varphi(q))$, где f и φ – произвольные достаточно гладкие функции, причем φ неотрицательна, а f'' не обращается тождественно в нуль. Подстановка в уравнение Лагранжа (4) дает

$$\varphi(q)f''(q)[\varphi(q)\ddot{q} + \varphi'(q)\dot{q}^2] = 0.$$

Отсюда, в силу произвольности φ и f'' , следует уравнение

$$\ddot{q} = -[\ln \varphi(q)]'\dot{q}^2. \quad (19)$$

При $\varphi = \text{const}$ имеем свободный режим генерации знаний $\ddot{q} = 0$, а при $\varphi = e^{-q}$ – простейший режим с обострением $\ddot{q} = \dot{q}^2$.

Рассмотрим режим с обострением, осложненный колебаниями. В этом случае функция φ содержит периодическую составляющую

$$\varphi(q) = e^{-q}(1 + \varepsilon \cos \omega q). \quad (20)$$

Колебания в демографической динамике могут быть связаны с крупномасштабными социальными процессами, например с возникновением, расцветом и упадком империй, глобальными технологическими революциями и социальными переустройствами. В силу неотрицательности φ амплитуда ε не должна превышать 1. Далее будем считать $0 \leq \varepsilon < 1$, а также $\omega \geq 0$.

Интегрирование уравнения (19) с функцией вида (20) и с начальными условиями

$$q(0) = q_0, \quad \dot{q}(0) = v_0$$

приводит к следующим результатам:

$$\dot{q} = \frac{v_0 e^{q-q_0}}{1 + \varepsilon \cos \omega q},$$

$$v_0(t_1 - t) = e^{q_0 - q} [1 + \varepsilon \cos \theta \cos(\omega q + \theta)]. \quad (21)$$

Введенные здесь величины: момент сингулярности t_1 и фаза θ – определяются из соотношений

$$t_1 = (1/v_0) [1 + \varepsilon \cos \theta \cos(\omega q_0 + \theta)],$$

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2}}, \quad \sin \theta = \frac{\omega}{\sqrt{1 + \omega^2}}.$$

Расчет по приведенным формулам представлен на рис. 9. Были приняты следующие значения параметров: $q_0 = 0$, $v_0 = 1$, $\varepsilon = 0.6$, $\omega = 3$. Поведение кривой демонстрирует логарифмическое сжатие времени по мере приближения к точке сингулярности.

В случае колебаний малой амплитуды ($\varepsilon \ll 1$) можно найти явную зависимость q от t путем разложения (21) по ε :

$$q = q_0 + \ln \frac{t_{10}}{t_1 - t} + \varepsilon \cos \theta \cos \left(\omega \ln \frac{t_{10}}{t_1 - t} + \omega q_0 + \theta \right) + O(\varepsilon^2), \quad (22)$$

где $t_{10} = 1/v_0$ – момент сингулярности в невозмущенной системе ($\varepsilon = 0$).

Уравнения (21) или, в частном случае, (22) описывают критическую динамику производства знаний развивающейся цивилизацией при наличии осцилляций.

Согласно (2) численность человечества пропорциональна скорости производства знаний \dot{q} . Вычисление производной по времени от (22) дает

$$\dot{q} = \frac{1}{t_1 - t} \left[1 - \varepsilon \sin \theta \sin \left(\omega \ln \frac{t_{10}}{t_1 - t} + \omega q_0 + \theta \right) + O(\varepsilon^2) \right]. \quad (23)$$

Уравнение типа (23) было получено ранее как эмпирическое для описания катастрофических явлений самой разной природы, например, динамики индекса Доу-Джонса перед мировым финансовым кризисом 1929 г. или динамики концентрации хлорид-ионов в подземных источниках перед землетрясением (цитируется по (Владимиров и др., 2000)). Теперь мы видим, что уравнение того же типа имеет место и для описания взрывного роста численности человечества. В книге (Коротаяев и др., 2007а) приводятся графики по демографической динамике Китая за период 700 г. до н.э. – 2003 г. н.э., которые демонстрируют осцилляции, накладывающиеся на взрывной рост численности населения. Ситуация качественно согласуется с тем, что дает зависимость (23) и что изображено на рис. 9.

ПРОТИВОБОРСТВО ЦИВИЛИЗАЦИЙ

Рассмотрим информационный подход к описанию конкуренции двух цивилизаций (например, двух враждебных государств). В процессе своего развития каждая цивилизация производит знания с определенной скоростью. Автономное развитие каждой из них происходит в одном из описанных выше режимов. Наличие конкуренции состоит в том, что цивилизации испытывает информационное воздействие со стороны конкурента, препятствующее собственному производству знаний. Борьба с конкурентом осуществляется, с одной стороны, путем воздействия на поток информации конкурента, а с другой стороны, путем уменьшения негативного влияния соседа на собственный поток информации.

Пусть \dot{q}_1, \dot{q}_2 – потоки условной информации, циркулирующие в каждой из цивилизаций. Вторая цивилизация воздействует на первую потоком \dot{q}_2 , а первая пытается уменьшить это воздействие посредством своего потока \dot{q}_1 . Чтобы полностью избавиться от негативного воздействия конкурента, собственный поток должен намного превышать поток конкурента. Формально, внешнее воздействие исчезает при $\dot{q}_1 \rightarrow \infty$. Если же свой поток мал $\dot{q}_1 \rightarrow 0$, то воздействие конкурента полностью определяется его потоком \dot{q}_2 . Следовательно, член, описывающий воздействие второй цивилизации на первую, должен быть пропорционален отношению $\dot{q}_2 / (1 + \gamma_1 \dot{q}_1)$. С учетом этого, приходим к следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_1 &= \dot{q}_1^2 - f_1(q_1)\dot{q}_1^3 - \frac{\beta_1 \dot{q}_2}{1 + \gamma_1 \dot{q}_1}, \\ \ddot{q}_2 &= \dot{q}_2^2 - f_2(q_2)\dot{q}_2^3 - \frac{\beta_2 \dot{q}_1}{1 + \gamma_2 \dot{q}_2}, \end{aligned} \quad (24)$$

где f_1, f_2 – функции, зависящие от режима производства знаний, $\beta_1, \beta_2 \geq 0$ – интенсивности внешнего воздействия, $\gamma_1, \gamma_2 \geq 0$ – интенсивности противодействия. В общем случае β_i и γ_i зависят от q_i . Масштабы количества информации q_i выбраны в (24) таким образом, чтобы коэффициенты при \dot{q}_1^2 и \dot{q}_2^2 были равны 1.

Рассмотрим конкуренцию двух цивилизаций, развивающихся в режиме с обострением; тогда $f_1, f_2 \equiv 0$. Кроме того, положим, что противодействие отсутствует: $\gamma_1, \gamma_2 = 0$. В этом случае вместо (24) получим

$$\ddot{q}_1 = \dot{q}_1^2 - \beta_1 \dot{q}_2, \quad \ddot{q}_2 = \dot{q}_2^2 - \beta_2 \dot{q}_1. \quad (25)$$

Обозначим поток условной информации $v = \dot{q}$ и запишем систему (25) в виде

$$\dot{v}_1 = v_1^2 - \beta_1 v_2, \quad \dot{v}_2 = v_2^2 - \beta_2 v_1. \quad (26)$$

В точке $v_1 = v_2 = 0$ имеет место неустойчивое равновесие. При $\beta_1 = \beta_2 = 1$ решение $v_1 = v_2 = 1$ структурно неустойчиво: небольшое изменение параметров β_i приводит к нарушению равновесия.

Численное решение системы (26) при начальных условиях

$$v_1(0) = v_{10}, \quad v_2(0) = v_{20}$$

представлено на рис. 10.

На верхнем графике выбраны одинаковые значения интенсивностей воздействия $\beta_1 = \beta_2$, но разные начальные значения потоков v_{10} и v_{20} , причем отличие составляет всего 10^{-4} . Но уже этого оказывается достаточно, чтобы предопределить судьбу менее удачливой цивилизации (с меньшим начальным значением потока). В определенный момент времени ($t = 1.11$) она не выдерживает конкуренции и гибнет, хотя до этого момента обе цивилизации развивались практически одинаково. Цивилизация с чуть большим начальным потоком продолжает расти, не замечая гибели конкурента.

На нижнем графике начальные значения потоков одинаковы $v_{10} = v_{20}$, а интенсивности воздействия немного отличаются. Та цивилизация, которая оказывает большее воздействие на конкурента, выживает и продолжает развиваться дальше, а вторая цивилизация гибнет – это происходит в момент времени $t = 1.09$.

Таким образом, едва ощутимого перевеса над соперником достаточно, чтобы подавить его. Это лишь вопрос времени.

Как следует понимать слова «гибель цивилизации»? Насколько снижение потока информации отразится на численности населения? Ответы на эти вопросы зависят от уровня развития цивилизаций. В докомпьютерную эпоху действовала совершенно жесткая связь между численностью населения и потоком информации, выражаемая соотношением (2), поскольку для получения знаний вся рецептируемая безусловная информация обрабатывалась мозгом человека. С появлением и развитием компьютерной техники обработка информации всё в большей степени переносится на электронный процессор. Это обстоятельство приводит к тому, что удельное производство знаний w в соотношении (2) перестает быть постоянной величиной, а напротив, растет по мере совершенствования аппаратного и программного обеспечения компьютеров.

Следовательно, интерпретация результатов конкуренции цивилизаций будет зависеть от того, на каком этапе развития находятся эти цивилизации. Если речь идет о докомпьютерной эпохе, то снижение потока условной информации с полной определенностью означает пропорциональное снижение численности населения, т.е. в данном случае гибель цивилизации в буквальном смысле означает гибель людей. Однако в компьютерную эпоху есть менее

жестокая альтернатива: снижение потока информации может достигаться выведением из строя компьютерных сетей и других сетей связи без физического уничтожения людей. В этом случае гибель цивилизации означает разрушение ее информационной инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена проблема развития цивилизации и ее взаимоотношения с биосферой. Важно было получить ответ на вопрос, что является движущей силой развития и какие факторы это развитие тормозят. Особая роль в описании динамики цивилизации отводится знаниям, которые эта цивилизация производит. Именно знания оказываются той силой, которая в течение всей истории человечества отодвигала поставленный природой предел, ограничивающий численность населения из-за нехватки ресурсов, неразвитости жизне-сберегающих технологий, неумения противостоять перманентно возникающим вызовам природы. Накопление знаний привело к расширению ресурсной базы, развитию технологий, созданию ресурсных циклов. В результате человечество на пять порядков превзошло численность диких животных, сопоставимых с человеком по размерам и питанию. Увеличение возможностей человека и вовлечение в оборот все новых ресурсов в конце концов натолкнулось на ограниченность ресурсов планеты. Это привело к торможению роста численности, которое стало заметно с последней четверти XX века и продолжает усиливаться с течением времени. Как пойдет развитие дальше, зависит от двух факторов. Первый из них – это демографическая емкость биосферы, определяемая как наибольшая численность населения, при которой биосфера не деградирует, т.е. поддерживается гомеостазис в системе цивилизация–биосфера. Второй фактор – эффективность восстановления окружающей среды – важен для поддержания гомеостазиса. В зависимости от соотношения этих факторов человечество либо вовремя останавливает свой рост, достигнув емкости биосферы, либо не успевает этого сделать и проходит точку равновесия. Тогда продолжение роста приводит к перенаселенности планеты и разрушению биосферы. Происходит коллапс, при котором численность падает, а затем, возможно, после нескольких колебаний, выходит на гомеостатический уровень. Такова качественная картина динамики цивилизации. В общих чертах она согласуется с результатами Форрестера и Медоуза (Forrester, 1971; Meadows et al, 1972; Медоуз и др., 1994; Медоуз, 1996) по моделированию мировой экономико-демографической динамики.

Моделирование динамики цивилизации осуществляется в работе на общесистемном уровне. Цивилизация рассматривается как система, производящая знания. Она описывается двумя макропеременными: численностью населения и количеством накопленных знаний. Формулируются законы производства знаний, связывающие численность населения с коли-

чеством накопленных знаний и скоростью их производства. Из этих законов следует, что в отсутствие ресурсных ограничений скорость производства знаний экспоненциально зависит от уже накопленного их количества, т.е. процесс протекает в режиме с обострением. Вообще оказывается, что динамику цивилизации можно описать исключительно в информационных терминах, оперируя только количеством знаний и скоростью их производства. Исходя из этой информационной парадигмы, можно сформулировать принцип наименьшего действия и использовать его для вывода динамических уравнений. Входящая в интеграл действия функция Лагранжа конструируется для разных режимов производства знаний: от простейшего режима с обострением до более сложного режима с затухающими колебаниями. Зная информационную динамику, можно перейти к динамике численности населения и рассчитать возможные сценарии будущего развития. В отсутствие глобальных биосферных ограничений численность человечества растет по гиперболическому закону, действующему в течение почти всей предшествующей эволюции, как об этом свидетельствуют демографические данные. Отклонение от этого закона, происходящее в последние десятилетия, обусловлено исчерпанием возможностей биосферы и свидетельствует о смене режима роста. Разработанная модель глобальной демографической динамики позволяет описать как эпоху гиперболического роста, так и современный переходный режим с постепенным прекращением роста и широким спектром возможностей дальнейшего хода численности: от стабилизации на высоком уровне до падения к низкому уровню, приемлемому для биосферы. Сформулирован информационный императив, в соответствии с которым глобальные демографические процессы подстраиваются под изменение объема накопленных человечеством знаний. Таким образом, знания выступают в качестве единственной движущей силы развития цивилизации.

Рассмотрен математический механизм, общий для систем разной природы, который приводит к режиму с обострением. Сущность его состоит в том, что изменение параметров системы приводит ее на грань устойчивости. Последующая за этим потеря устойчивости и переход к новому состоянию проявляются на начальном этапе перехода как гиперболический рост типа того, что наблюдается в глобальной демографической динамике.

Если на гиперболический рост накладываются осцилляции, то можно наблюдать эффект логарифмического сжатия времени. Построена модель, описывающая такого рода критическую динамику с осцилляциями, которая применима к разным явлениям, в том числе, к производству знаний и демографическому процессу.

Важность быстрого наращивания знаний наглядно демонстрирует пример противоборства двух цивилизаций, обобщенная модель которого рассмотрена в работе. Противоборство осуществляется через взаимодействие информационных потоков. Оказывается, что даже микроскопическая разница в начальном уровне развития или в скорости производства

знаний приводит в определенный момент времени к надлому, быстрому поражению и неизбежному распаду отстающей цивилизации, несмотря на то, что весь предшествующий период обе цивилизации двигались практически вровень друг с другом. Противоборство на пределе возможностей вскрывает генетические пороки общества, связанные с недостаточной эффективностью социально-экономического устройства, с хроническим отставанием в сфере науки и образования, и приводит к тому, что имевшееся в самом начале чисто символическое отставание накапливается с течением времени и, достигнув критической величины, вызывает неожиданный катастрофический коллапс. История дает достаточно примеров, подтверждающих этот тезис.

ЛИТЕРАТУРА

Анисимов В., 2004. О законе возрастания сложности эволюционирующих систем.

<http://aicommunity.narod.ru/TheBase/KombEvol.html>.

Владимиров В.А., Воробьев Ю.Л., Салов С.С. и др., 2000. Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. М.: Наука. 431 с.

Горшков В.Г., 1995. Физические и биологические основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ. 470 с.

Горшков В.Г., 1996. Запасы и потоки информации в биоте и цивилизации // Докл. РАН 350 (1), 135–138.

Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С., 2000. Экологический вызов и устойчивое развитие. М.: Прогресс-Традиция. 416 с.

Дольник В.Р., 1992. Существуют ли биологические механизмы регуляции численности людей? // Природа 6, 3–16.

Капица С.П., 1992. Математическая модель роста народонаселения мира // Мат. моделирование 4 (6), 65–79.

Капица С.П., 1996. Феноменологическая теория роста населения Земли // Успехи физ. наук 166 (1), 63–80.

Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., 2003. Синергетика и прогнозы будущего. М.: УРСС. 284 с.

Колмогоров А.Н., 1956. Теория передачи информации. М.: Изд-во АН СССР.

Колмогоров А.Н., 1965. Три подхода к определению понятия «количество информации» // Проблемы передачи информации 1 (1).

Коротаев А.В., Малков А.С., Халтурина Д.А., 2007а. Законы истории: Математическое моделирование Мир-Системы. Демография, экономика, культура. М.: КомКнига. 224 с.

- Коротаев А.В., Комарова Л.Н., Халтурина Д.А., 2007б. Законы истории: Вековые циклы и тысячелетние тренды. Демография, экономика, войны. М.: КомКнига.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., 1965. Механика. М.: Наука. 204 с.
- Льюин Р., 1987. Гены. М.: Мир. 480 с.
- Люри Д.И., 2004. Траектории развития экологических кризисов // Докл. РАН 394 (2), 252–254.
- Малинецкий Г.Г., Подлазов А.В., Кузнецов И.В., 2007. О национальной системе научного мониторинга // Новое в синергетике: новая реальность, новые проблемы, новое поколение. М.: Наука. С. 40–78.
- Малков А.С., Коротаев А.В., Халтурина Д.А., 2007. Математическая модель роста населения Земли, экономики, технологии и образования // Новое в синергетике: новая реальность, новые проблемы, новое поколение. М.: Наука. С. 148–186.
- Медоуз Д.Л., 1996. За пределами роста // Системные исследования: методологические проблемы. Ежегодник 1992–1994. М.: УРСС. С. 29–40.
- Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л., Рандерс Й., 1994. За пределами роста. М.: Прогресс, Пангея. 304 с.
- Найденов В.И., Кожевникова И.А., 2003. Математические модели численности населения Земли // Докл. РАН 393 (5), 591–596.
- Подлазов А.В., 2002. Теоретическая демография. Модели роста народонаселения и глобального демографического перехода // Новое в синергетике: Взгляд в третье тысячелетие. М.: Наука. С. 324–345.
- Поляков В.И., 2002. Неизбежность развития глобального экологического кризиса в XXI веке // Энергия 9, 42–49.
- Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б., 2004. Биофизическая динамика продукционных процессов. М., Ижевск: Ин-т компьютерных исследований. 464 с.
- Свирижев Ю.М., 1987. Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. М.: Наука. 368 с.
- Северцов А.С., 1992. Динамика численности человечества с позиций популяционной экологии животных // Бюлл. Моск. общества испытателей природы. Отд. биол. 97 (6), 3–17.
- Сперри Р.У., 1994. Перспективы менталистской революции и возникновение нового научного мировоззрения // Мозг и разум. М.: Наука. С. 20–44.
- Тейяр де Шарден П., 2001. Феномен человека. М.: Устойчивый мир. 232 с.
- Чернавский Д.С., 2004. Синергетика и информация. Динамическая теория информации. М.: УРСС. 288 с.

- Юдин Д.Б., Юдин А.Д., 1985. Математики измеряют сложность // Число и мысль. Вып. 8. М.: Знание. 192 с.
- Biraben J.-N., 1979. Essai sur l'évolution du nombre des hommes // Population 1, 13.
- Dolgonosov V.M., Naidenov V.I., 2006. An informational framework for human population dynamics // Ecol. Modelling 198 (3–4), 375–386.
- Forrester J.W., 1971. World Dynamics. Cambridge, Massachusetts: Wright-Allen Press. 139 p. (Имеется перевод: Форрестер Дж., 1978. Мировая динамика. М.: Наука.)
- Jones S., Martin R.D., Pilbeam D.R. (Eds.), 1994. The Cambridge Encyclopedia of Human Evolution. Cambridge University Press, Cambridge.
- Keyfitz N., 1971. Population: Facts and Methods of Demography. Freeman, San Francisco.
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W., 1972. The Limits to Growth. N.Y.: Universe Books.
- Smail J.K., 2002. Confronting a surfeit of people: reducing global human numbers to sustainable levels // Environ. Develop. Sustainability 4, 21–50.
- Svirezhev Yu.M., Svirejeva-Hopkins A., 1998. Sustainable biosphere: critical overview of basic concept of sustainability // Ecol. Modelling 106, 47–61.
- Total Midyear Population for the World: 1950–2050, 2005.
<http://www.census.gov/ipc/www/worldpop.html>.
- Vitousek, P.M., Ehrlich, P.R., Ehrlich, A.N., Matson, P.A., 1986. Human appropriation of the products of photosynthesis // BioScience 36, 368–373.
- von Foerster H., Mora P.M., Amiot L.W., 1960. Doomsday: Friday, 13 November, A.D. 2026 // Science 132, 1291–1295.
- von Horner S., 1975. Population explosion and interstellar expansion // J. Brit. Interplanet. Soc. 28, 691.
- World Population Prospects, 2005. The 2004 Revision. Population Database,
<http://esa.un.org/unpp/>.

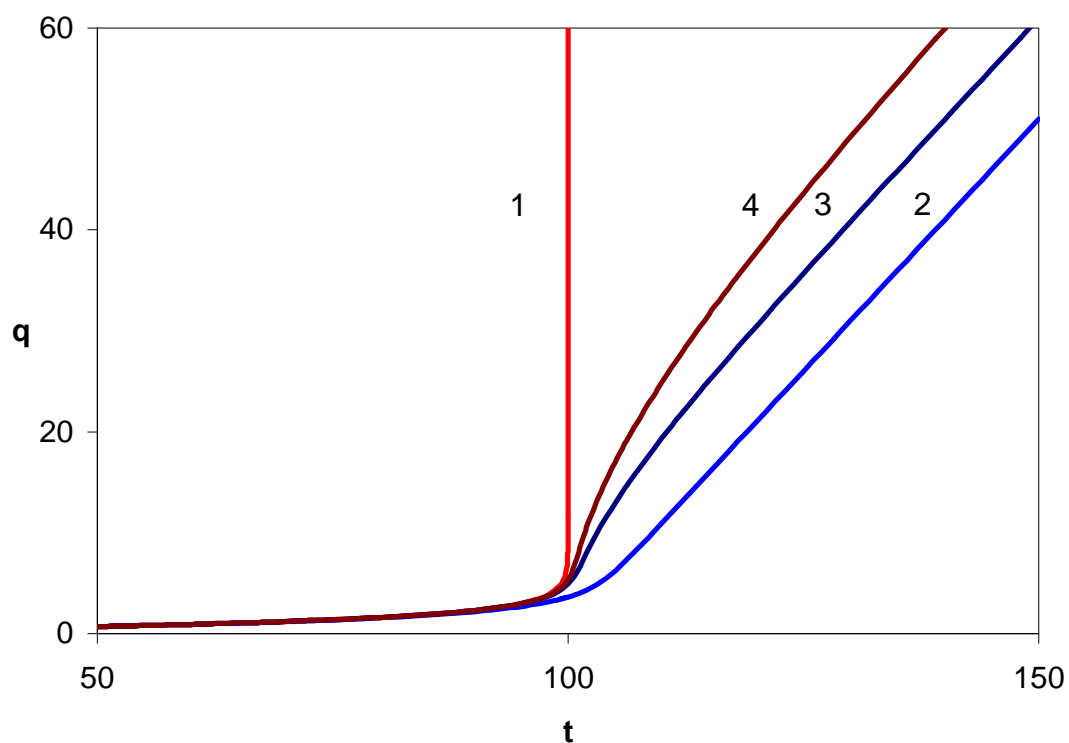
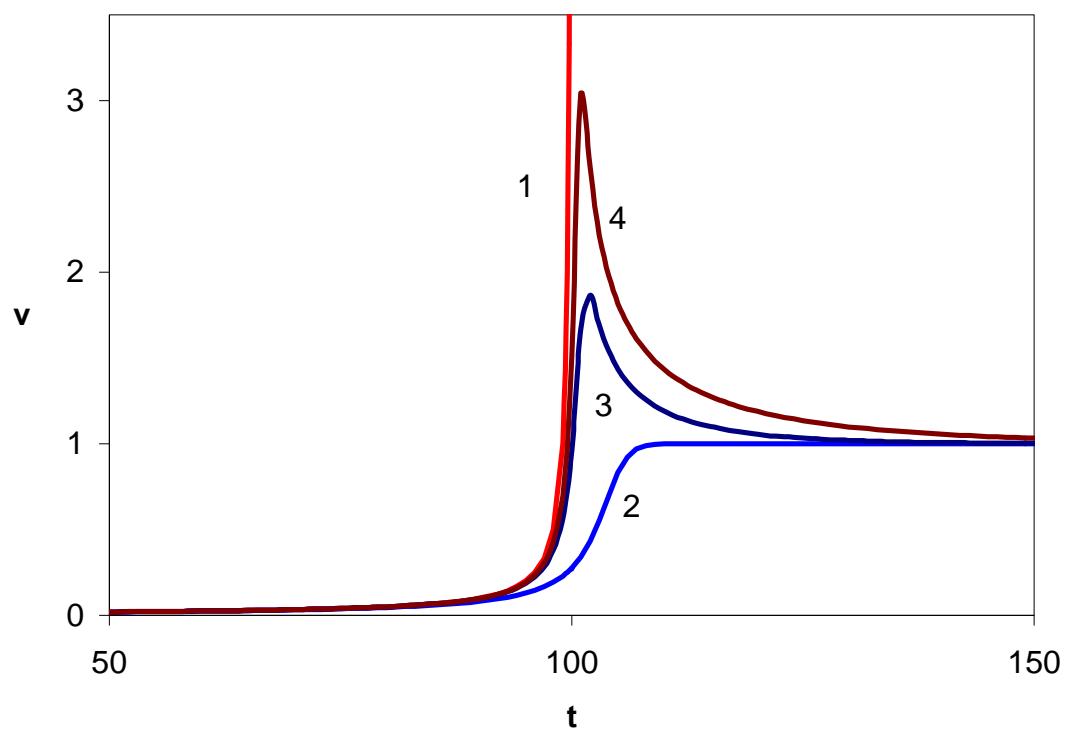


Рис. 1. Скорость производства v и объем накопленных знаний q в режимах с обострением (1), со стабилизацией (2) и с возвратом при $\alpha = 0.1$ (3) и $\alpha = 0.05$ (4). Во всех режимах в начальный момент времени знания отсутствуют $q_0 = 0$, а начальная скорость производства знаний равна $v_0 = 0.01$.

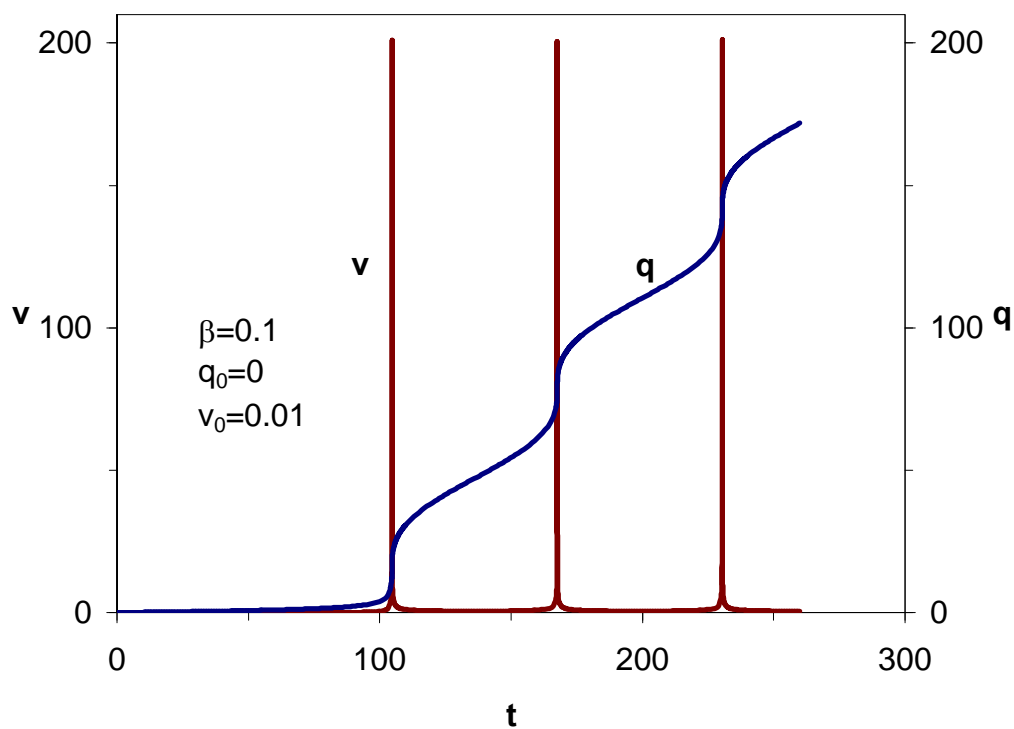
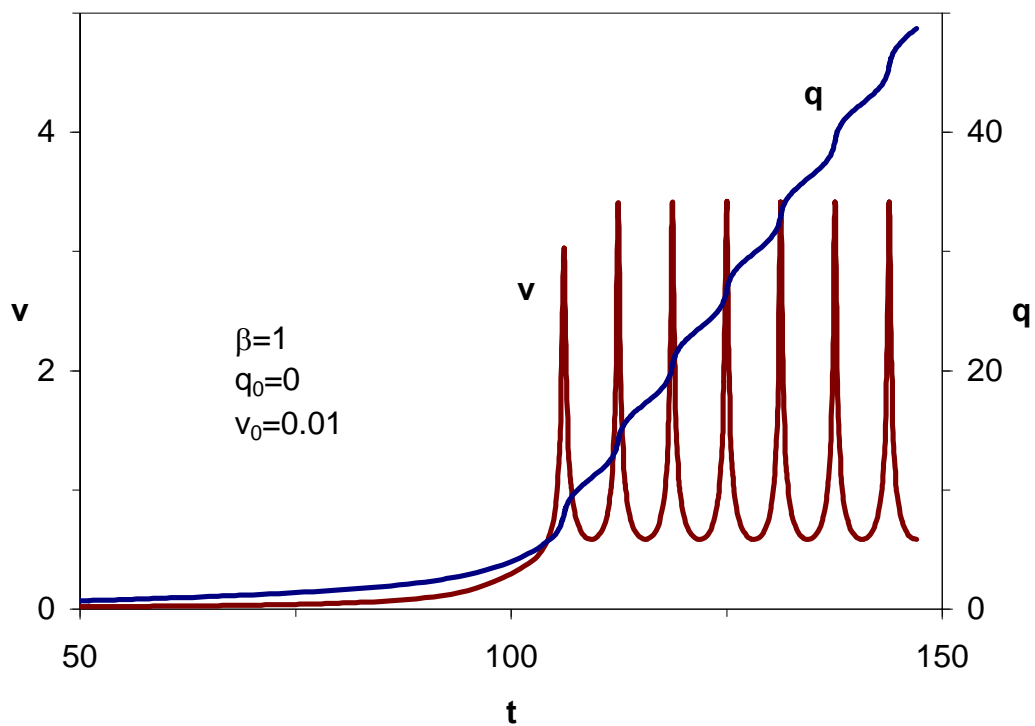
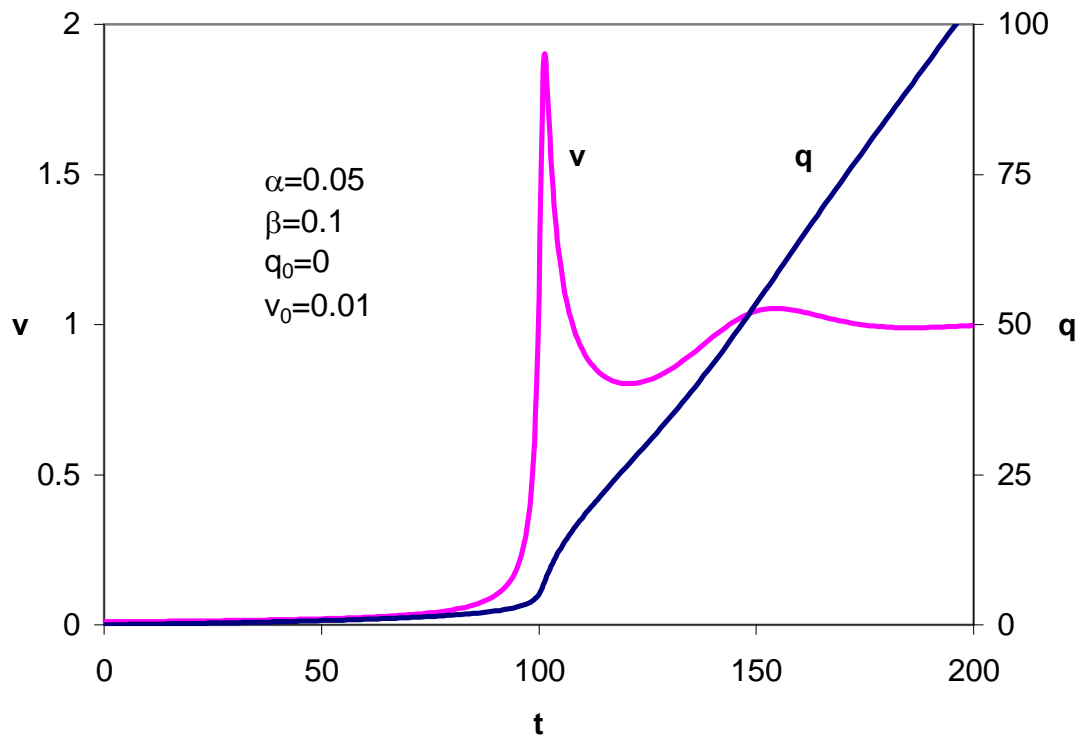
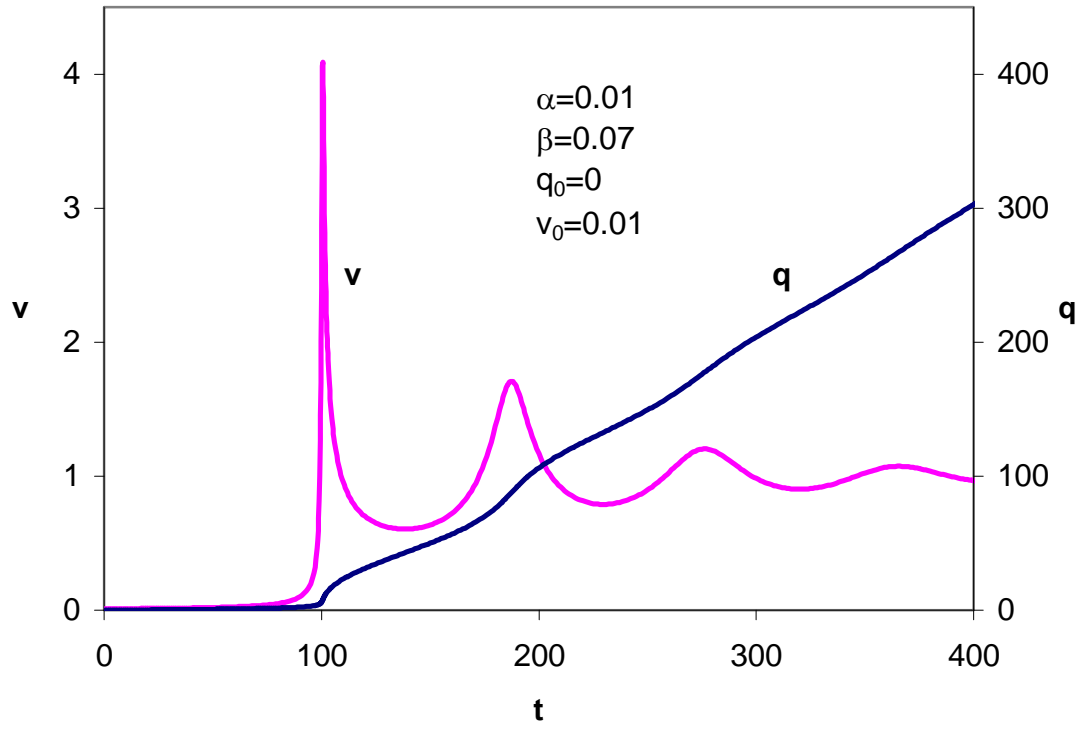


Рис. 2. Скорость производства v и объем накопленных знаний q в колебательных режимах с разными частотами. Значения q_0 и v_0 – как на рис. 1.



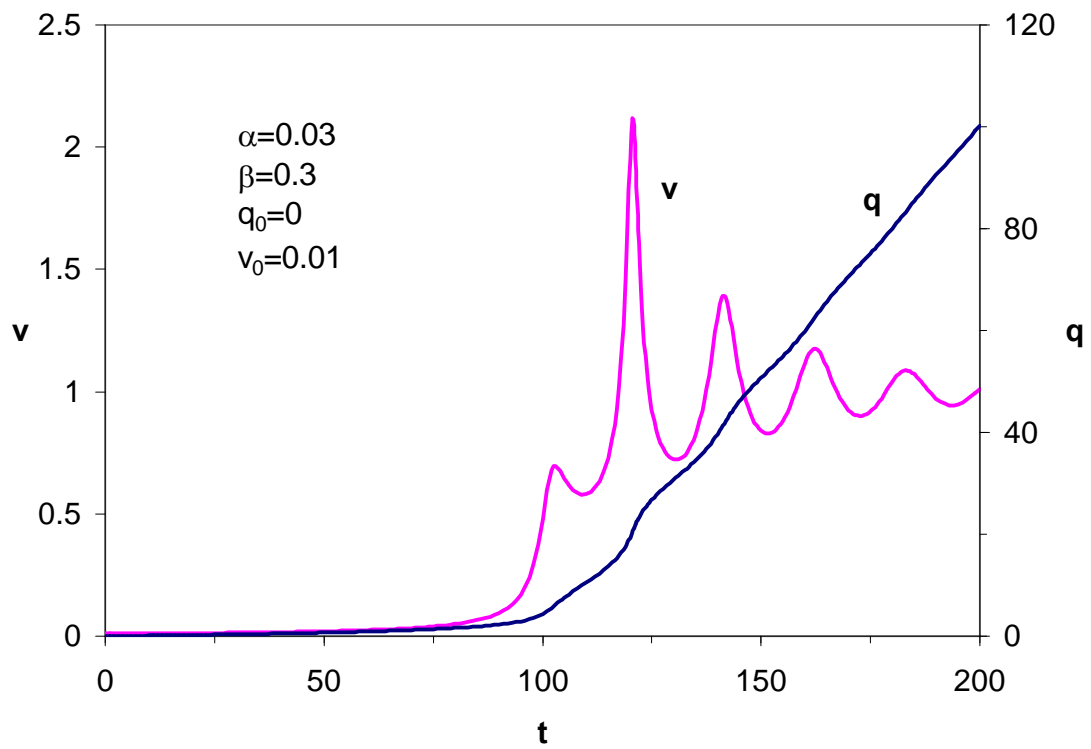


Рис. 3. Скорость производства и объем накопленных знаний в трех разных режимах с затухающими колебаниями.

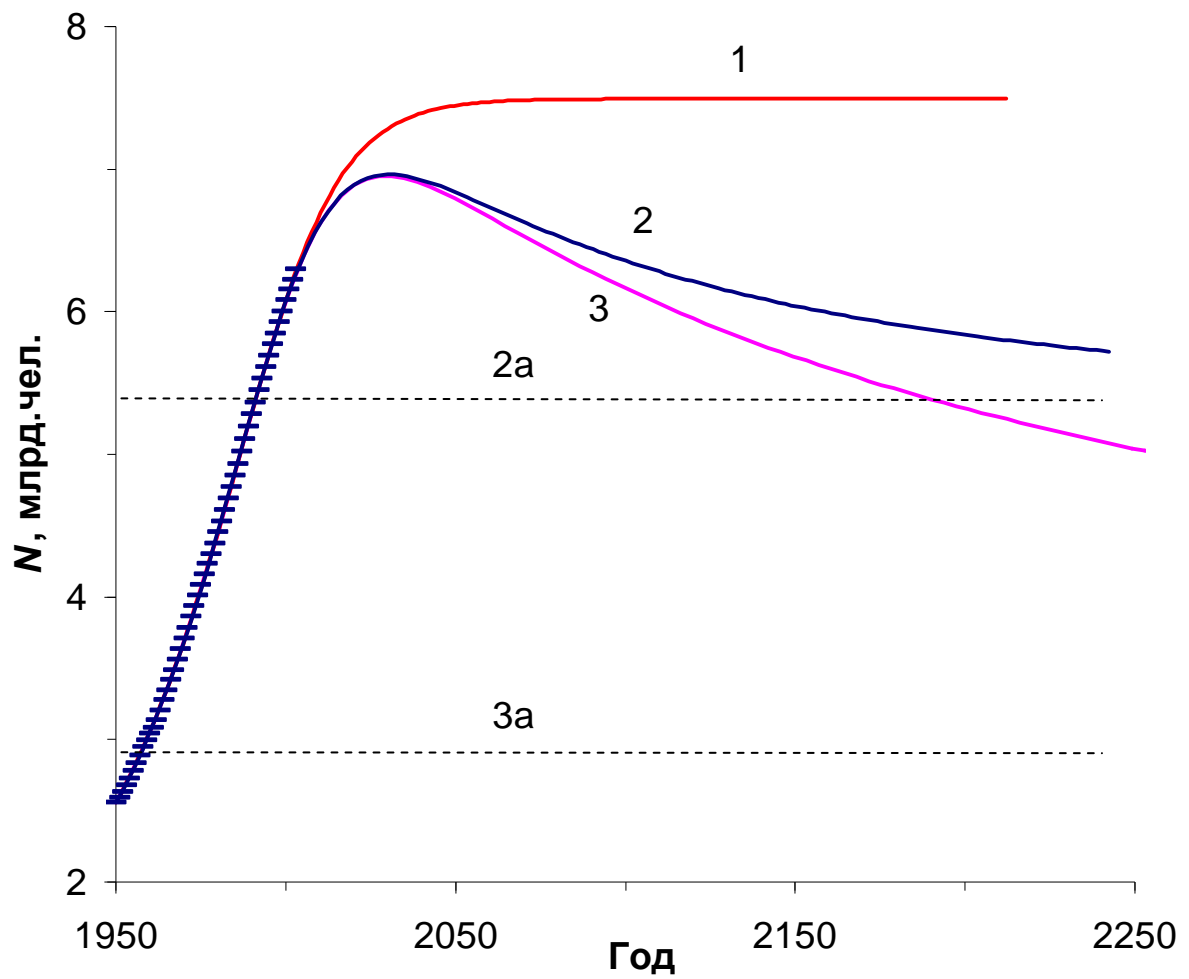


Рис. 4. Изменение численности населения со временем. Номер у кривой соответствует номеру сценария в табл. 1. Кривая 1 соответствует решениям 1a и 1b, которые практически совпадают. Линии 2a и 3a показывают стационарные численности, к которым стремятся кривые 2 и 3 соответственно. Маркерами обозначены демографические данные.

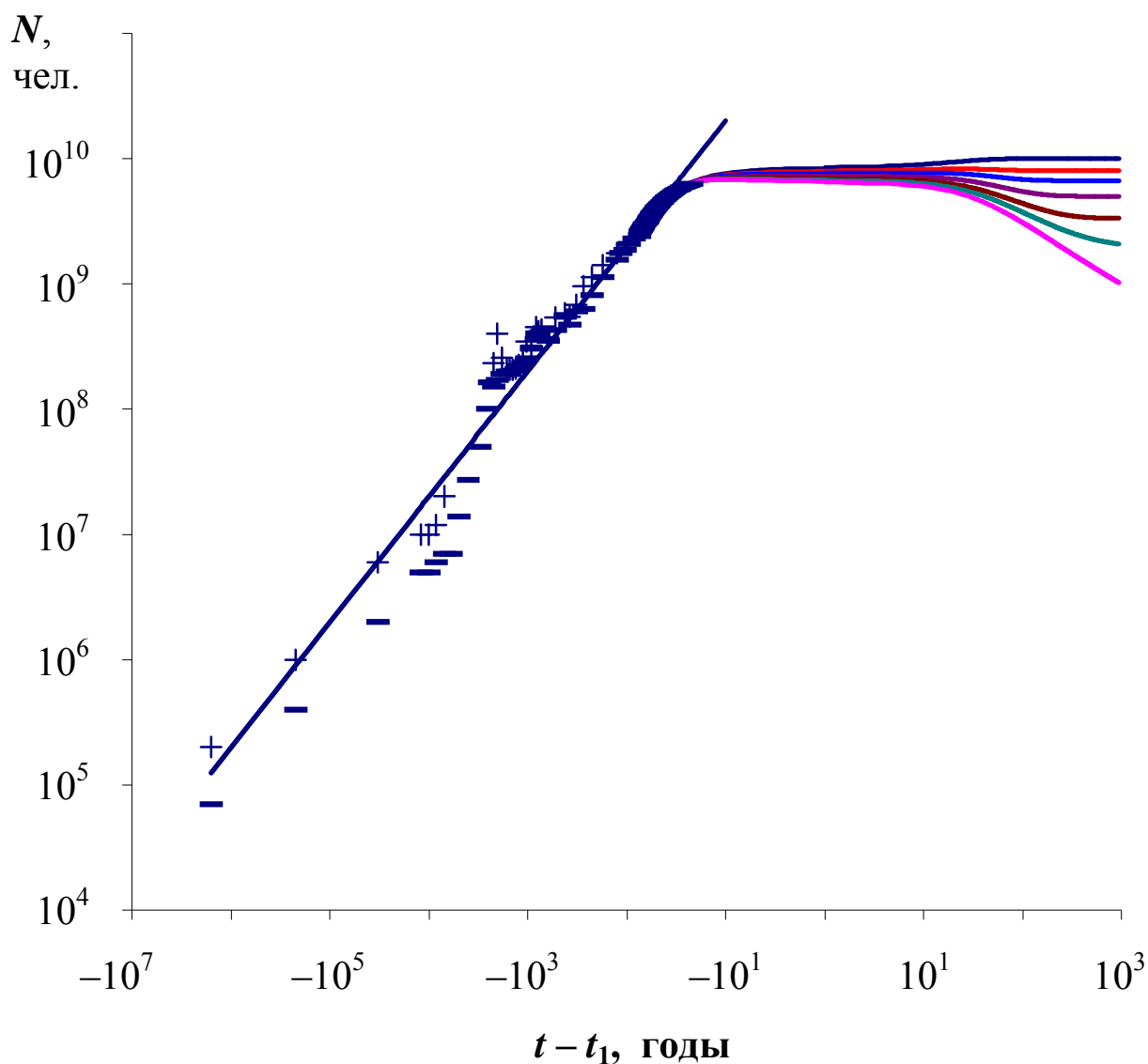


Рис. 5. Динамика численности человечества за период 1.6 млн. лет с различными сценариями дальнейшего развития. Демографические данные: «+» – оценки сверху, «-» – оценки снизу. Прямая соответствует режиму с обострением. Кривые – модельные расчеты по сценариям 1–7 (см. табл. 2); номера кривых возрастают сверху вниз.

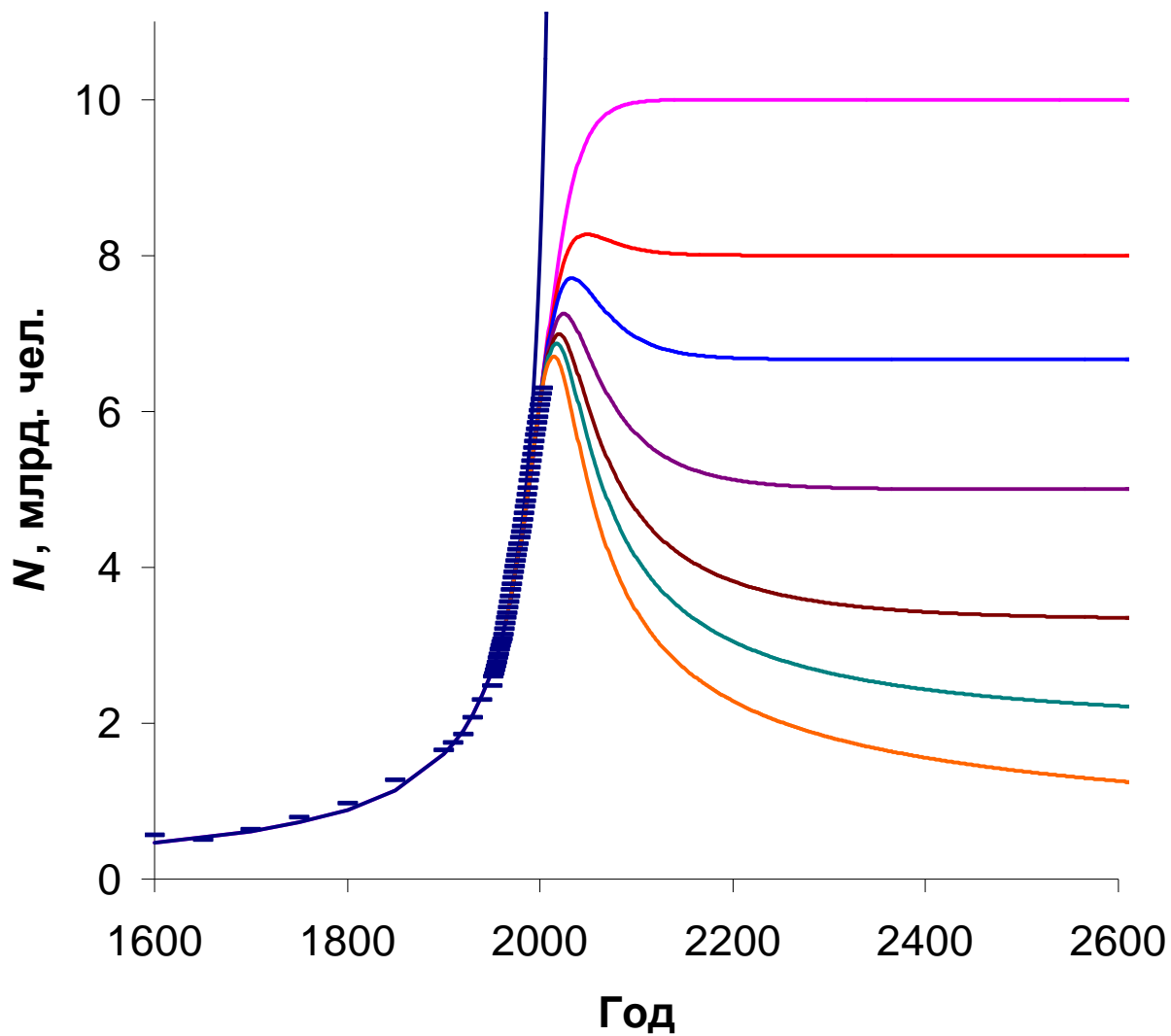


Рис. 6. Динамика численности человечества в переходный период. Маркеры показывают средние демографические данные. Кривая для режима с обострением уходит на бесконечность по мере приближения к точке сингулярности. Другие кривые упорядочены как на рис. 5.

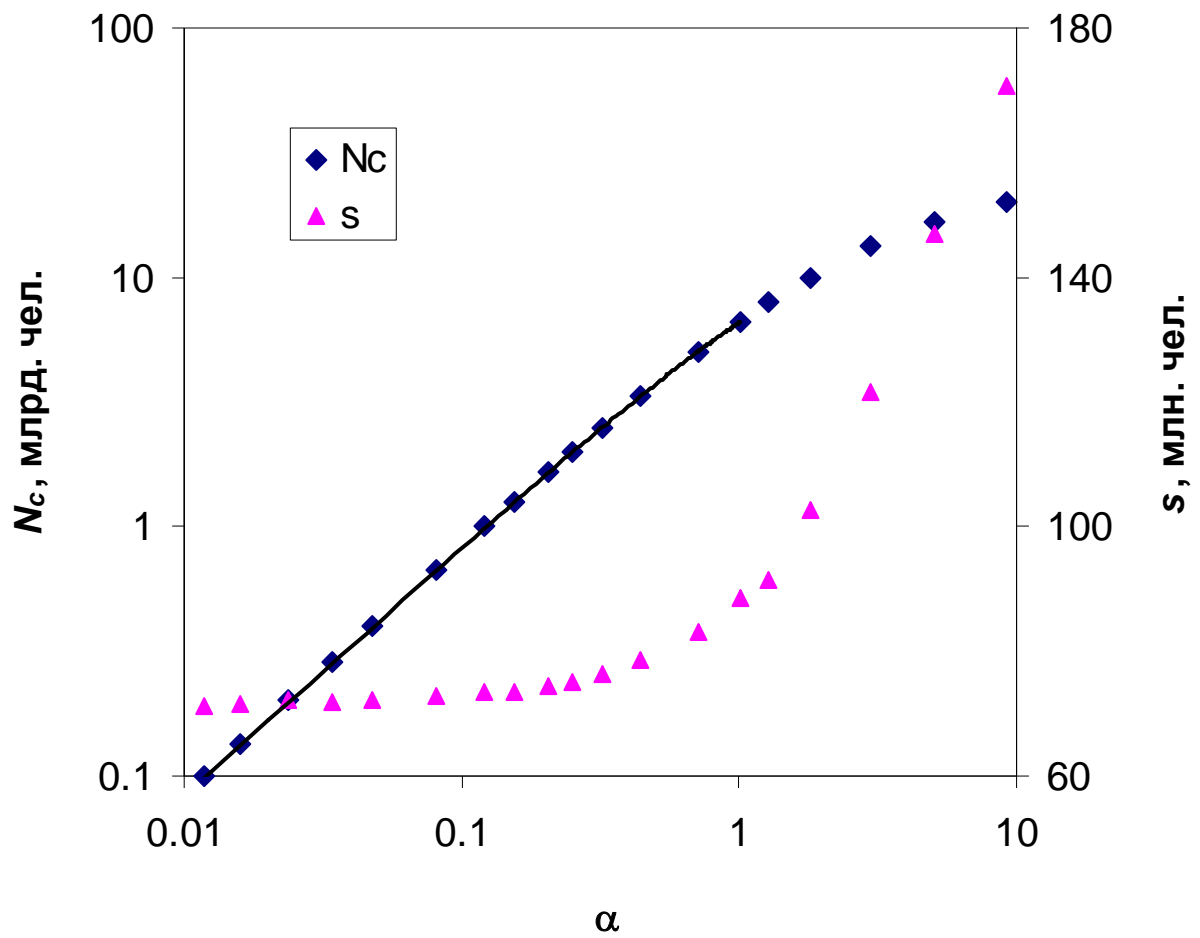


Рис. 7. Несущая емкость биосферы N_c и среднеквадратичное отклонение s теоретической кривой от демографических данных в зависимости от параметра α .

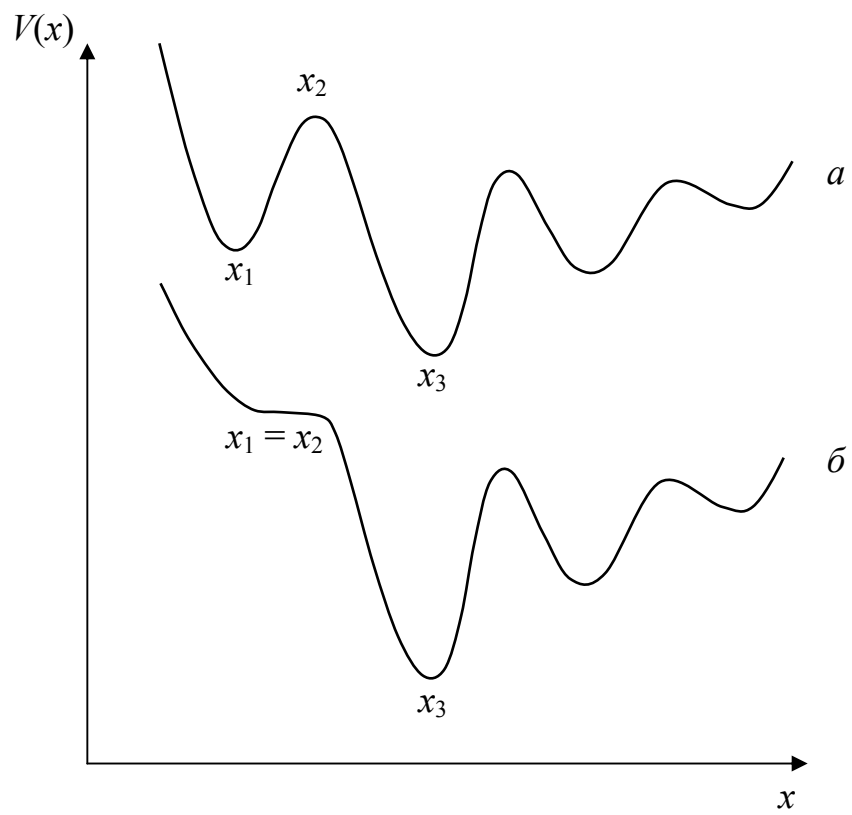


Рис. 8. Потенциал системы: a – состояние x_1 устойчиво, b – момент потери устойчивости $x_1 = x_2$.

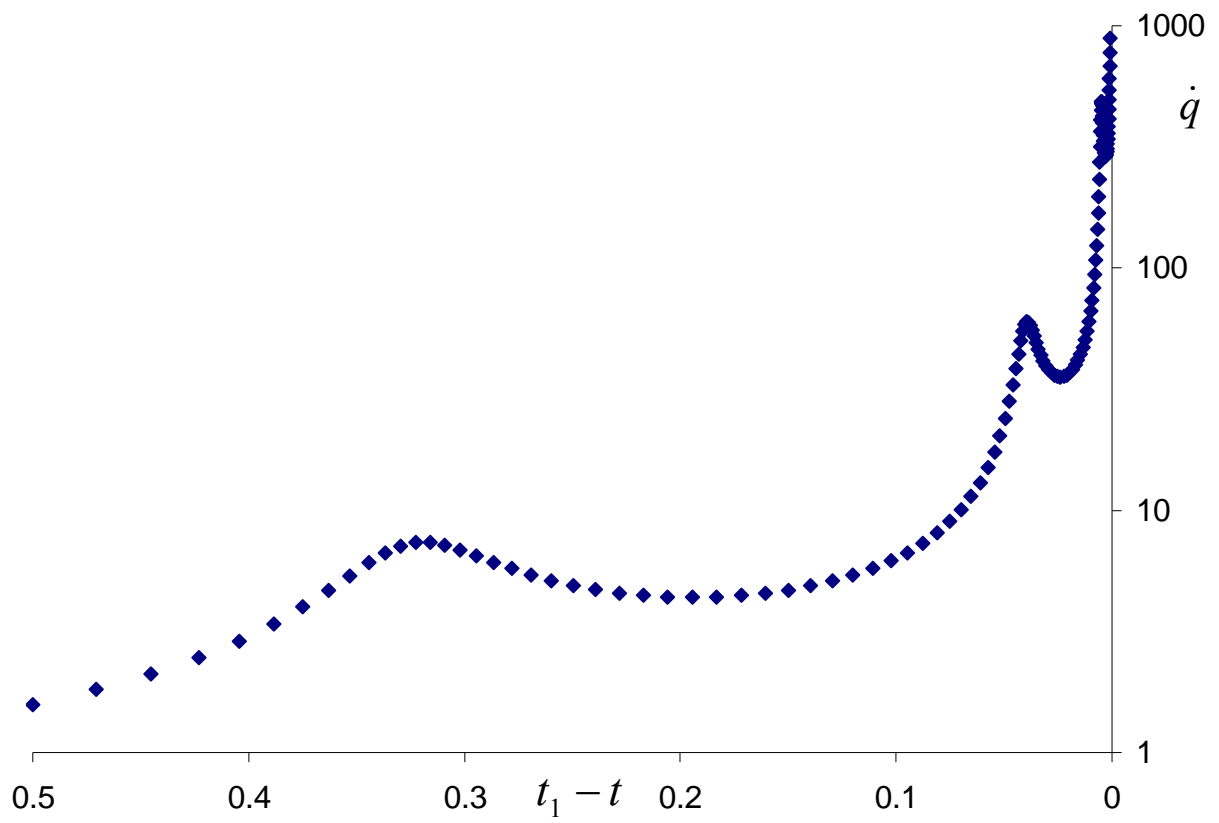


Рис. 9. Критическая динамика скорости производства знаний (или численности населения) при приближении к точке сингулярности.

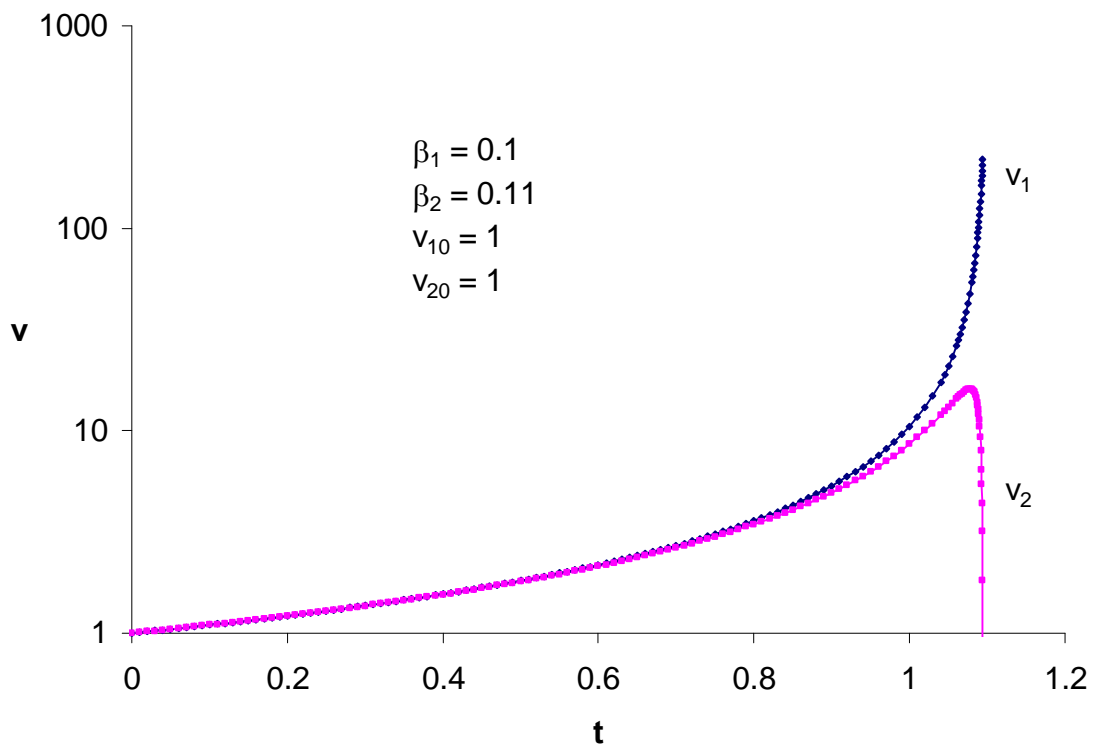
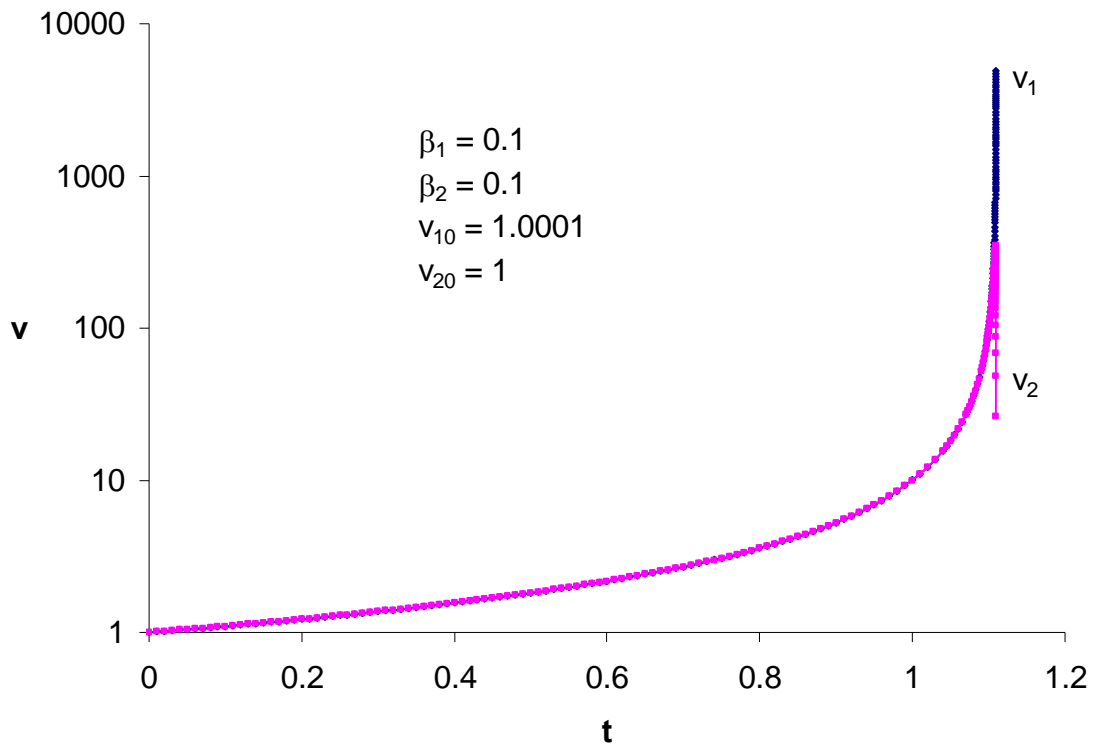


Рис. 10. Два сценария развития конкурирующих цивилизаций. Показана зависимость потоков информации от времени.