

Информационная концепция динамики численности человечества

Б.М. Долгоносов, В.И. Найденов

Институт водных проблем РАН, 119991 Москва, ГСП-1, ул. Губкина 3.

E-mail: borismd@aqua.laser.ru

Аннотация. Цивилизация рассматривается как система, в которой производится и накапливается информация. Из того факта, что биологические характеристики человека мало изменились за время его эволюции (это касается, прежде всего, свойств генома и мозга), постулировано сохранение объема генетической и нейронной памяти и средней скорости производства информации человеком по этим каналам. Показано, что в настоящее время скорость производства новой информации по каналам генетической, нейронной и внешней памяти примерно одинакова и составляет $\sim 10^1 - 10^2$ бит/(чел.год). Оценки накопленной человечеством информации таковы: во внешней памяти (фонды библиотек) $\sim 10^{14}$ бит, в генетической памяти $\sim 10^{13}$ бит, в нейронной памяти $\sim 10^{12} - 10^{13}$ бит. Из принципа наименьшего действия получены уравнения информационной динамики цивилизации, которые описывают разные режимы производства информации. Соотношение прямой пропорциональности между общей скоростью производства информации и численностью населения позволяет перейти от информационной к демографической динамике. В отсутствие глобальных биосферных ограничений численность человечества экспоненциально зависит от количества накопленной информации, что является причиной гиперболического роста численности, наблюдавшегося в течение почти всей предшествующей эволюции. 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 накопленной человечеством информации. Таким образом, информация выступает в качестве единственной движущей силы развития цивилизации.

Ключевые слова: информация; динамика численности человечества; несущая емкость биосферы; устойчивое развитие; моделирование.

У непрерывно развивающегося разума может быть только одна цель: изменение природы Природы.
Аркадий и Борис Стругацкие «За миллиард лет до конца света»

1. ВВЕДЕНИЕ

Человеческая цивилизация – это открытая эволюционирующая система, наделенная памятью и способная производить информацию. Эволюция таких систем происходит в направлении увеличения сложности и сопровождается внутренней самоорганизацией, в частности возникновением сознания как специфического проявления организованной сложности (Тейяр де Шарден, 1959). Уровень развития цивилизации определяется количеством накопленной информации. Естественно ожидать, что ее численность будет существенным образом зависеть от уровня развития. Рассматривая рост населения Земли, Ферстер и др. (1960), Хернер (1975), а затем Капица (1992, 1996) отметили необычный, «взрывной» закон роста численности, который описывается не мальтузианской экспонентой, а гиперболической зависи-

мостью от времени. По существующим демографическим данным и палеонтологическим оценкам этот закон действовал на протяжении миллиона лет и прекращает свое действие в наши дни. Для объяснения наблюдаемого феномена Капица предложил информационную гипотезу в соответствии с которой «не скорость размножения, а именно совокупный опыт, взаимодействие, распространение и передача из поколения в поколение знаний, обычаев и культуры качественно отличают эволюцию человечества и определяют скорость роста населения».

В статье предложена информационная концепция динамики численности населения Земли, подтверждающая эту гипотезу.

2. КОЛИЧЕСТВО НАКОПЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Человеческий мозг выполняет функцию процессора, который обрабатывает поступающие сигналы, и одновременно функцию памяти для хранения информации. Различные факты накапливаются в памяти и анализируются с целью выработки правил, которые можно будет применять в типовых ситуациях. Совокупность фактов и правил образует *знания* человека. Эти знания, записанные на внешних носителях и опубликованные, становятся достоянием всего человечества и используются для решения практических задач и производства новых знаний. Далее термин *информация* понимается в смысле *знания*, и оба термина употребляются как синонимы.

Оценим количество накопленной человечеством информации, учитывая разные возможности ее хранения: с использованием генетической памяти организма, передаваемой из поколения в поколение; нейронной памяти мозга, пополняемой за счет обучения; внешней памяти, роль которой выполняют в частности бумажные и электронные носители. Для численных оценок используем данные работы (Анисимов, 2004).

Представление о количестве информации, накопленной во внешней памяти, можно получить по фондам хранения библиотек. Крупнейшей библиотекой в мире считается библиотека Конгресса США, в которой объем только текстовой информации составляет 7 Тбайт, т.е. примерно 10^{13} – 10^{14} бит. Это значение надо скорректировать как в сторону уменьшения – за счет повторов информации в разных текстах, так и в сторону увеличения – за счет добавления нетекстовой информации (графической, звуковой, видео и пр.), а также информации, содержащейся в памяти компьютеров.

В настоящее время в мире используется около полумиллиарда компьютеров. Каждый из них содержит типовые программы и уникальную информацию в виде оригинальных программ, текстов, графиков и пр. Количество уникальной информации, не опубликованной в печати и не выставленной в глобальной сети, относительно невелико. В (Анисимов, 2004) приведена оценка в 1 Мбайт на компьютер для уникальной информации, содержащейся в компьютерах организации, где работает автор. При пересчете на среднемировой уровень надо учесть большое число бытовых компьютеров с малым объемом оригинальной информации. Надо иметь в виду также, что значимая оригинальная информация со временем публикуется. Поэтому средняя глобальная оценка должна быть на 1–2 порядка скромнее, т.е. менее 0.1 Мбайт на компьютер. Это дает менее 10^{14} бит уникальной информации на всех компьютерах мира, что не превышает объем текстовой информации.

Генетическая память разных людей во многом совпадает. Длина генетического кода человека $\sim 6 \cdot 10^9$ бит (Льюин, 1987). Устранение избыточности кода дает информационную емкость генетической памяти порядка 10^8 бит/чел (Анисимов, 2004). Различие в структуре геномов у двух человек, не находящихся в родстве, около 0.1%, что составляет 10^5 бит новой генетической информации на группу родственников. Размер средней группы живущих родственников $\sim 10^2$ человек, так что на человека приходится 10^3 бит/чел новой генетической информации. При общей численности населения $\sim 6 \cdot 10^9$ человек накопленная человечеством генетическая информация составляет $\sim 6 \cdot 10^9 \cdot 10^3 \sim 10^{13}$ бит, т.е. на порядок меньше количества информации, содержащейся во внешней памяти.

Емкость нейронной памяти, физически доступная для хранения получаемой из внешнего мира информации, порядка 10^8 – 10^9 бит/чел (Горшков 1996). Совместное проживание и общение людей делает нейронную память, оснащенную нейронным процессором, коллективным разумом цивилизации. В нейронной памяти человечества хранится жизненный опыт и профессиональные знания людей, что в сумме повторяет значительную часть информации из внешней памяти, дополняя ее нигде не зафиксированными уникальными сведениями личного характера. В (Анисимов, 2004) приводится оценка 10^{12} – 10^{13} бит, т.е. величина, близкая к количеству накопленной генетической информации. Современное человечество уже не в состоянии удерживать в нейронной памяти всё, что накоплено во внешней памяти.

Проведенный анализ дает оценку общего объема информации, накопленного цивилизацией на разных носителях: $\sim 10^{14}$ бит. Для сравнения укажем объем генетической информации в глобальной биоте: 10^{15} – 10^{16} бит (Горшков, 1996; Горшков и др., 2002). Эта величина получается перемножением числа видов в биоте $\sim 10^7$ (Thomas, 1990) и среднего числа нуклеотидных пар в их геномах 10^8 – 10^9 (Lewin, 1994).

Важным фактором является доступность информации для широкого круга пользователей, которые могут на ее основе производить новые знания. В этом смысле, цивилизационное значение имеют только открытые (обобществленные) знания. Человеческая эволюция покрыла планету сетью идей, которой Тейяр де Шарден (1959) присвоил термин "ноосфера". Знания составляют основу ноосферы, а их объем характеризует уровень развития цивилизации.

Знания позволяют распознавать различные состояния окружающего мира, о которых свидетельствуют поступающие сигналы. В соответствии с шенноновским определением количества информации (Николис, 1989; Хакен, 1991) связь между объемом знаний q и числом R распознаваемых состояний задается соотношением $q = \log_2 R$. Соответственно, при данном уровне знаний q человечество способно распознавать $R = 2^q$ состояний, а рост знаний экспоненциально расширяет кругозор человека.

Чтобы ориентироваться в масштабах величин, приведем оценку верхнего предела количества информации, который определяется числом состояний Метагалактики. Число квантов ее фазового пространства определяется выражением $Q = ET/h$, где $E = Mc^2$ – энергия Метагалактики, M и T – ее масса и возраст, c – скорость света, h – постоянная Планка. Полагая, что каждый квант имеет как минимум два состояния, получим оценку снизу общего числа состояний: 2^Q . Этому соответствует количество информации $\log_2 2^Q = Q$. С учетом значений $M = 1.58 \cdot 10^{58}$ г, $T = 5.72 \cdot 10^{17}$ с, $c = 3.00 \cdot 10^{10}$ см/с, $h = 6.63 \cdot 10^{-27}$ эрг·с (Mohr and Taylor, 1998) находим $Q \approx 10^{123}$ бит. По сравнению с этой грандиозной величиной человечество накопило ничтожно малое количество информации.

3. ПРОИЗВОДСТВО ИНФОРМАЦИИ

Человек предстает одновременно в двух ипостасях: как производитель и как носитель информации. Производство информации осуществляется по внутренним каналам памяти – генетическому и нейронному. Скорость по первому каналу определяется вероятностью возникновения новых комбинаций генов и скоростью размножения людей. По второму каналу производство информации осуществляется в процессе интеллектуальной деятельности. Скорость этого процесса определяется функциональными возможностями мозга, оснащенного речью и письменностью для передачи и хранения информации и дополненного в последнее время устройствами переработки и хранения информации (компьютеры и их внешняя память). В ходе эволюции появление развитой речи позволило людям свободно обмениваться информацией. В результате отпала биологическая потребность в увеличении объема мозга, как это было на ранних этапах становления человека. Эволюция пошла по пути увеличения численности производителей информации при неизменных свойствах мозга (объема памяти и скорости производства информации) и при сохранении основных характеристик генома, ответственных за передачу наследственной информации. Действительно, есть основания ут-

верждать, что на протяжении последнего миллиона лет человек биологически мало изменился, а все основное развитие и самоорганизация человечества происходили в социальной сфере (Cambridge Encyclopedia, 1994; Wood, 1992).

Сохранение объема памяти означает, что число состояний внешнего мира, распознаваемых человеком, не изменяется с течением времени: $R/N = \text{const}$. С учетом $R = 2^q$ получим

$$N \sim 2^q, \quad (0)$$

т.е. численность человечества должна экспоненциально расти с накоплением знаний (отметим в скобках, что причина этого, конечно же, кроется в развитии жизнеспасающих технологий и, как следствие, в уменьшении смертности). Подчеркнем, что при выводе этого соотношения предполагалось, что накопление информации идет преимущественно по внутренним каналам памяти (нейронному и генетическому). Преобладающая роль этих каналов сохранялась практически всю историю человечества за исключением последнего времени, когда большая часть информации идет уже по каналу внешней памяти. В этом случае соотношение (0) перестает действовать. Есть и другая причина, по которой режим роста (0) 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 (0). В конечном итоге, должен установиться гомеостазис, при котором численность населения соответствует несущей емкости биосферы.

Сохранение удельной скорости (w) производства информации по всем каналам памяти можно записать в виде $\dot{q}/N = w = \text{const}$, откуда следует:

$$\dot{q} = wN, \quad (1)$$

где $\dot{q} \equiv dq/dt$ – общее производство информации цивилизацией. В частности, при постоянной численности населения информация производится с постоянной скоростью. Из (1) находим:

$$q(t) = w \int_0^t N(t') dt', \quad (2)$$

т.е. вклад в накопление знаний вносило всё жившее человечество.

Как отмечалось выше, на человека приходится новая генетическая информация в размере $\sim 10^3$ бит/чел. Разделив эту величину на продолжительность жизни $\sim 10^1 - 10^2$ лет, получим $w \sim 10^1 - 10^2$ бит/(чел-год). Таково удельное производство информации по генетическому каналу.

По каналам нейронной и внешней памяти оценка производится следующим образом. За всё время существования человечества жило ~ 100 млрд. человек (Капица, 1992, 1996). К настоящему времени накоплено $\sim 10^{14}$ бит информации. С учетом продолжительности жизни из соотношения (2) находим $w \sim 10^1 - 10^2$ бит/(чел-год). До эры книгопечатания накопление информации шло с указанной скоростью по нейронному каналу, тогда как в последний период подключился канал внешней памяти (книги). В соответствии с этой оценкой человек за свою жизнь производит $\sim 10^3$ бит новой информации по каналам нейронной и внешней памяти, т.е. примерно столько же, сколько по генетическому каналу.

Таким образом, по всем трем каналам цивилизация производит информацию с примерно одинаковой скоростью.

Существовавшая ранее чисто человеческая цивилизация сменилась в постиндустриальную эпоху человеко-компьютерной, в которой процесс обработки первичных данных всё в большей мере переносится с нейронного на электронный носитель, повышая удельную скорость производства информации w . Теперь интенсификация производства информации достигается не только увеличением численности населения, но и поддержанием высоких темпов совершенствования аппаратного и программного обеспечения компьютеров. В последнее время вычислительная мощность компьютеров удваивается каждые 1.5 года (Что такое закон Мура, 2003) и есть признаки сокращения этого промежутка с течением времени,

что свидетельствует о гиперболическом (а не экспоненциальном) законе роста со своей точкой «технологической сингулярности». В этих условиях увеличение численности населения перестает быть обязательным условием развития цивилизации.

Связь численности N со скоростью производства информации \dot{q} имеет принципиальное значение. Мозг непрерывно получает из внешней среды сигналы и преобразует их в информацию, необходимую для выработки приспособительных реакций, т.е., в конечном итоге, для выживания. Такая деятельность может прекратиться только со смертью. Поэтому если производство информации обращается в нуль $\dot{q} = 0$ (одновременно «замораживается» достигнутый уровень знаний: $q = \text{const}$), 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 информации, а сам факт существования цивилизации всегда означает, что $\dot{q} > 0$.

4. ИНФОРМАЦИОННАЯ ПАРАДИГМА

Развитие цивилизации происходит на фоне конкурентной борьбы производителей информации разных видов (под видами подразумеваются разные биологические виды или разные группы в рамках одного вида). Доминирует вид с наиболее высокой скоростью производства информации. Изменение условий среды приводит время от времени к смене доминантных видов. Особенность такого подхода состоит в том, что в нем роль первичных сущностей играют производители информации. Вероятно, к этому направлению следует отнести интересный информационно-термодинамический подход Jorgensen (1997, 1999) к описанию сосуществующих биологических видов в экосистемах – подход, основанный на построении особого термодинамического потенциала – эксэргии, которая учитывает объемы генетической информации отдельных видов.

Однако возможен и другой подход, переносащий акцент с производителей на саму информацию. Сформулируем его в виде *информационной парадигмы*: информация представляет собой самостоятельную развивающуюся сущность, которая на разных этапах своей эволюции может использовать разные виды производителей и базироваться на разных носителях. Более того, информация выступает в качестве движущей силы эволюции, выбирая среди разных конкурирующих видов наиболее производительные и регулируя их численность.

В современную эпоху самым производительным видом стал человек. Именно поэтому человечество по своей численности на пять порядков превышает сравнимых с человеком по размерам и питанию диких животных.

Информационная парадигма заставляет взглянуть на информацию как на первичную сущность со своими собственными законами эволюции. Это позволяет получить уравнения динамики информации, а затем перейти к численности производителей по соотношению (1).

5. ИНФОРМАЦИОННАЯ ДИНАМИКА

Принципы. Рассмотрим цивилизацию как систему, в которой производится информация. Свою деятельность система осуществляет в соответствии с принципом наименьшего действия: $S \rightarrow \min$, где функционал действия на фиксированном интервале времени (t_1, t_2) определяется как

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

Предполагается, что лагранжиан L описывает состояние системы, для задания которого достаточно знать количество информации q и скорость ее производства \dot{q} . Лагранжиан задается неоднозначно: он определен с точностью до постоянного множителя; кроме того, возможно прибавление к лагранжиану полной производной по времени от произвольной функции q и t (Ландау и Лифшиц, 1965).

Приравнивая нулю вариацию действия (при фиксированных концах траектории), получим уравнение Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = 0. \quad (3)$$

Рассмотрим развитие одинокой цивилизации. Отсутствие выделенного начала отсчета времени (т.е. его однородность) означает, что лагранжиан не должен явно зависеть от времени: $L = L(q, \dot{q})$. Внешних источников информации нет – вся она производится внутри системы. Если производство прекращается, т.е. $\dot{q} = 0$, цивилизация гибнет, а ее лагранжиан вырождается: $L(q, 0) = a_0 = \text{const}$, превращая уравнение (3) 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:

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

В силу неоднозначности лагранжиана константу a_0 можно положить равной нулю. Следующий (пропорциональный \dot{q}) член в правой части также может быть опущен, так как он является полной производной по времени: $(d/dt) \int a_1(q) dq$. Таким образом, содержательная часть разложения начинается с квадратичного члена:

$$L(q, \dot{q}) = a_2(q)\dot{q}^2 + \dots \quad (4)$$

Далее рассмотрим несколько простейших лагранжианов, совместимых с (4) и отражающих разные режимы производства информации.

Для упрощения формул переменные q и t приводятся к масштабам q_c и t_c , характерным для рассматриваемой задачи. Возврат к размерным переменным осуществляется заменой $q \rightarrow q/q_c$ и $t \rightarrow t/t_c$.

Постоянный режим: информация производится с постоянной скоростью: $\dot{q} = \text{const} = v_0$. Согласно (1), этот режим характерен для гомеостатической цивилизации с постоянной численностью (условие (0) в этом случае не действует из-за ресурсных ограничений). Накопление информации идет, в основном, по каналу внешней памяти. Простейший лагранжиан, приводящий к этому режиму, получается из (4) 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 информации экспоненциально растет с ее накоплением: $\dot{q} \sim e^q$. Это соотношение прямо следует из уравнений (0) и (1), если исключить из них N (точнее, получается $\dot{q} \sim 2^q$, но в данном случае это различие несущественно, так как оно устраняется соответствующим выбором масштаба q_c). К режиму с обострением приводит лагранжиан вида $L = \dot{q}^2 e^{-2q}$. Соответствующее уравнение Лагранжа

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

Рассматривая $v \equiv \dot{q}$ как информационный поток, можно сказать, что его прирост $\dot{v} = v^2$ обусловлен взаимодействием информационных потоков, циркулирующих в цивилизации.

Решение уравнения (6) при начальных условиях $q(0) = q_0$, $\dot{q}(0) = v_0$ приводит к гиперболическому нарастанию скорости производства информации:

$$\dot{q} = (t_1 - t)^{-1},$$

где $t_1 = 1/v_0$ – точка сингулярности. Накопление информации происходит по закону

$$q = q_0 - \ln(1 - t/t_1).$$

Зависимость q и $v = \dot{q}$ от t показана на рис. 1.

Смешанные режимы. С началом действия глобальных ресурсных ограничений закон (0), а вместе с ним и соотношение $\dot{q} \sim e^q$ нарушаются. Возникают эффекты торможения производства информации, которые можно описать соотношением $\dot{q} \sim e^q / [1 + c(q)e^q]$, где $c(q)$ – некоторая функция. 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 $c(q)$ конкретизируется ниже.

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 имеет вид (введено обозначение $v = \dot{q}$):

$$v = (1 + C_1 e^{-q})^{-1}, \quad t = q - C_1 e^{-q} + C_2,$$

где

$$C_1 = e^{q_0} \left(\frac{1}{v_0} - 1 \right), \quad C_2 = \frac{1}{v_0} - 1 - q_0.$$

Функция $v(t)$ монотонно возрастает (рис. 1), 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 информации, а затем возвращается назад, приближаясь к стационарному состоянию с постоянным режимом генерации информации. Лагранжиан задается выражением (7), в котором

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

В пределе $\alpha \rightarrow 0$ получаем режим с обострением, а при $\alpha \rightarrow \infty$ – режим со стабилизацией. Можно привести и другие виды функций $c(q)$ с заданным качественным поведением, но указанный выбор является простейшим. В этом случае уравнение Лагранжа :

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

Отсюда находим (рис. 1):

$$v = \left(1 - \frac{e^{-\alpha q}}{1 - \alpha} + C_1 e^{-q} \right)^{-1}, \quad t = q + \frac{e^{-\alpha q}}{\alpha(1 - \alpha)} - C_1 e^{-q} + C_2,$$

где

$$C_1 = e^{q_0} \left(\frac{1}{v_0} - 1 + \frac{e^{-\alpha q_0}}{1 - \alpha} \right), \quad C_2 = \frac{1}{v_0} - 1 - q_0 - \frac{e^{-\alpha q_0}}{\alpha}. \quad (9)$$

Отметим, что полученное решение имеет в точке $\alpha = 1$ устранимую особенность.

Функция $v(t)$ имеет максимум при условии $(1 - \alpha)C_1 > 0$. Координаты максимума:

$$v_{\max} = (1 - e^{-\alpha q_m})^{-1}, \quad t_m = C_2 + q_m + \frac{1 + \alpha}{\alpha} e^{-\alpha q_m}, \quad q_m = \frac{1}{1 - \alpha} \ln \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha} C_1 \right).$$

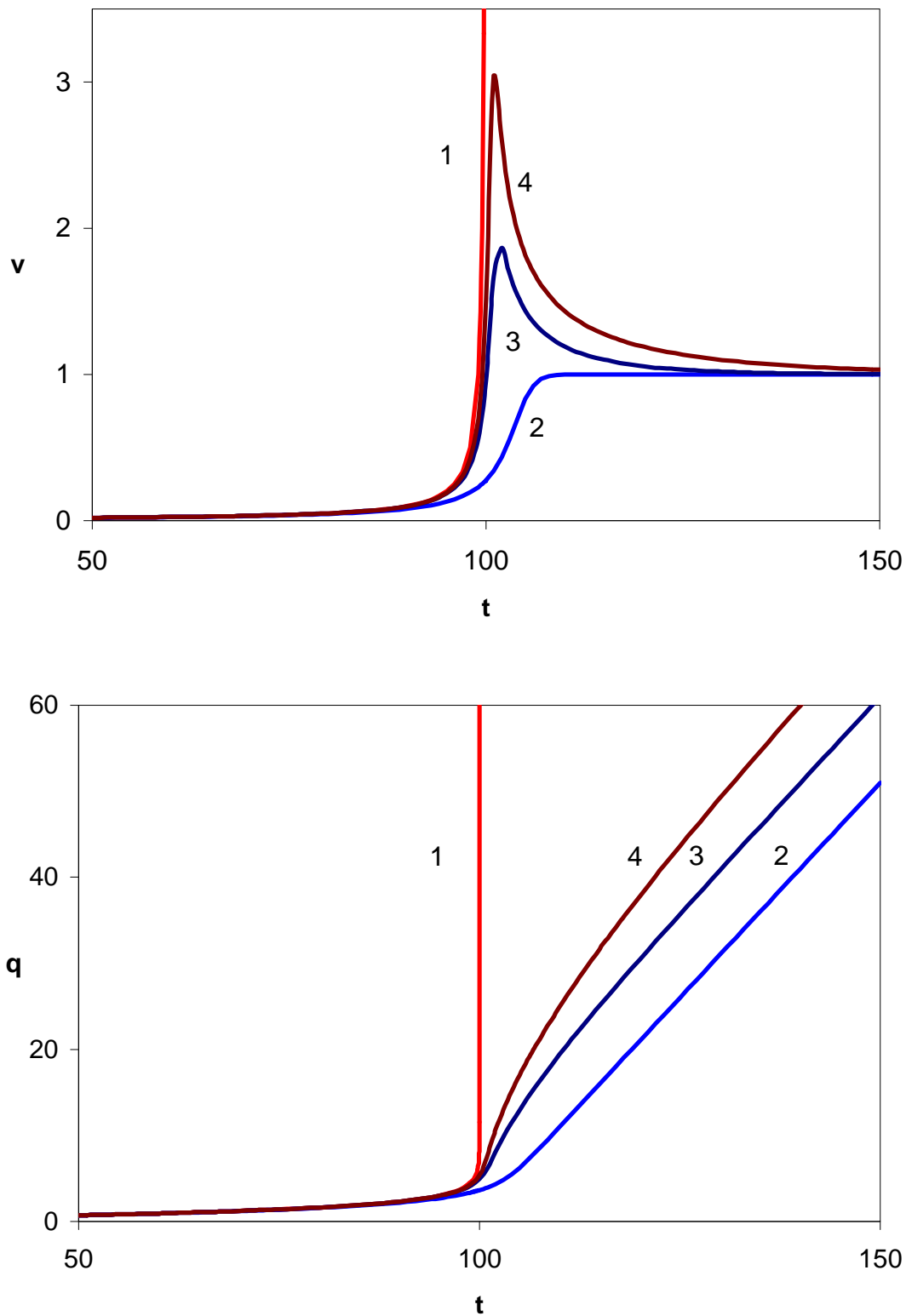


Рис. 1. Скорость производства v и количество накопленной информации q в режимах с обострением (1), со стабилизацией (2), с возвратом при $\alpha = 0.1$ (3) и $\alpha = 0.05$ (4). Во всех режимах в начальный момент времени запас информации отсутствует $q_0 = 0$, а скорость производства информации равна $v_0 = 0.01$.

В важном частном случае $q_0 = 0$ (отсутствие начального запаса знаний) максимум существует в интервале $0 < \alpha < \alpha_1$, где $\alpha_1 = 1/(1 - v_0)$. При $\alpha \rightarrow 0$ высота максимума растет по закону $v_{\max} \approx 1/[-\alpha \ln(\alpha v_0)]$, а достигается он в момент $t_m \approx 1/v_0$. Напротив, при $\alpha \rightarrow \alpha_1$ максимум вырождается: его высота понижается до уровня плато, а точка максимума уходит на бесконечность. Описанное поведение максимума функции $v(t)$ с изменением α демонстрируется на рис. 2. Расчеты проводились при $q_0 = 0$ и при малой начальной скорости производства знаний $v_0 = 0.01 \ll 1$. В этом случае верхняя граница интервала существования максимума близка к 1, точнее $\alpha_1 \approx 1.01$.

Колебательный режим описывает повторяющийся процесс возрождения и упадка цивилизации, характеризующийся последовательностью этапов: сначала накопление информации в режиме с обострением, достижение максимума скорости производства информации; затем падение скорости, достижение ее минимума, возврат к режиму с обострением и т.д. В этом случае простейший лагранжиан имеет вид (7), в котором

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

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:

$$v = \left(1 - \frac{\cos \beta q}{\sqrt{1 + \beta^2}} + C_1 e^{-q} \right)^{-1}, \quad t = q - \frac{\sin \beta q}{\beta \sqrt{1 + \beta^2}} - C_1 e^{-q} + C_2,$$

где

$$C_1 = e^{q_0} \left(\frac{1}{v_0} - 1 + \frac{\cos \beta q_0}{\sqrt{1 + \beta^2}} \right), \quad C_2 = C_1 e^{-q_0} - q_0 + \frac{\sin \beta q_0}{\beta \sqrt{1 + \beta^2}}.$$

В установившемся режиме функция $v(t)$ становится периодической с периодом $T = 2\pi / \beta$.

Ее экстремумы равны

$$v_{\min, \max} = \left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2}} \right)^{-1},$$

верхний знак отвечает минимуму, а нижний – максимуму. Экстремумы достигаются в точках

$$t_n = q_n + C_2, \quad q_n = n\pi / \beta, \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

четные n соответствуют максимумам, нечетные – минимумам.

Результаты расчетов при начальных условиях $q_0 = 0$ и $v_0 = 0.01$ и разных значениях β представлены на рис. 3. 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 информации. Лагранжиан имеет вид (7), в котором

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

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

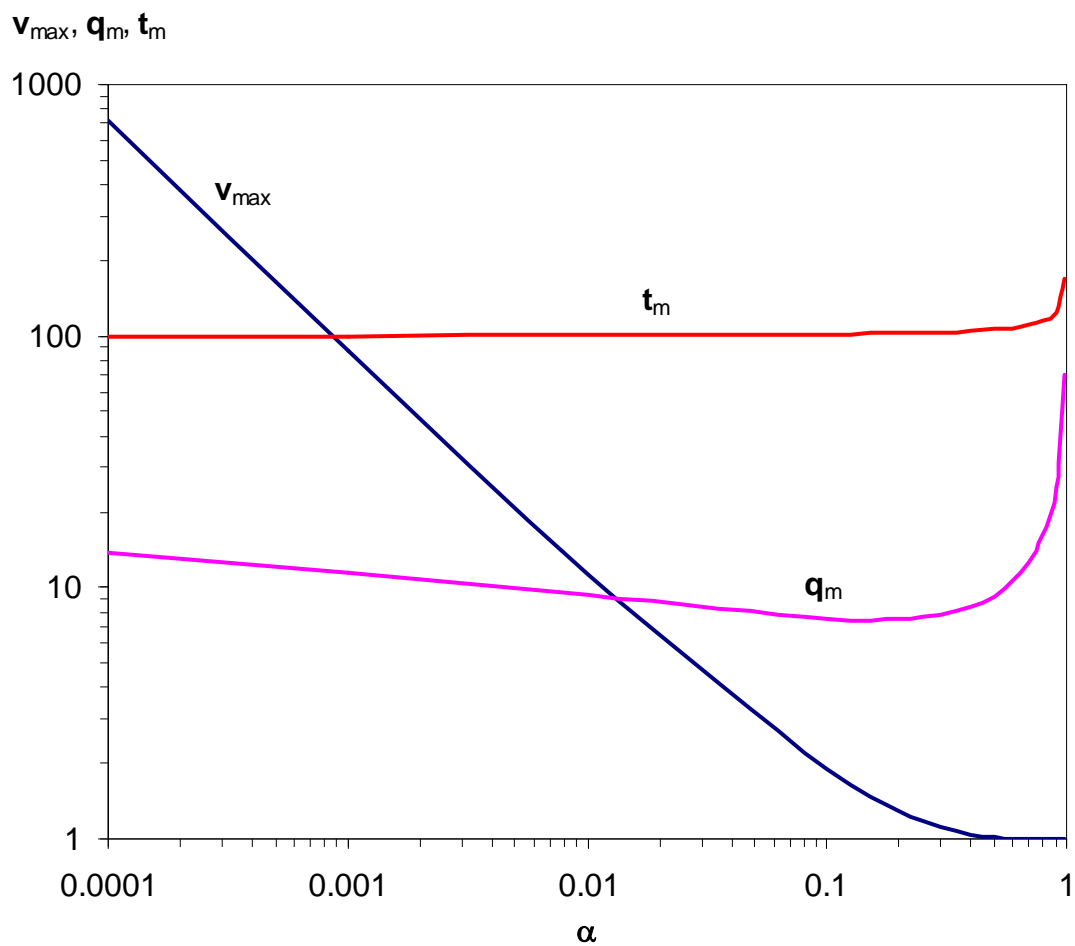


Рис. 2. Максимум производства информации v_{\max} для режима с возвратом, момент его достижения t_m и количество информации q_m в этот момент в зависимости от α . Значения q_0 и v_0 как на рис. 1

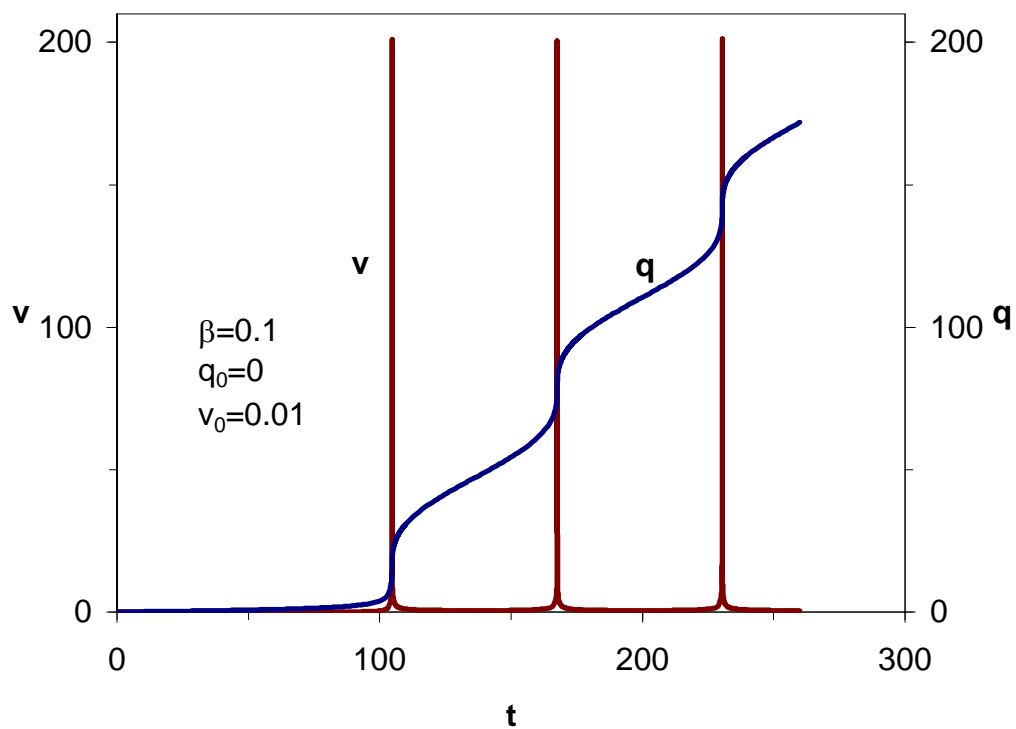
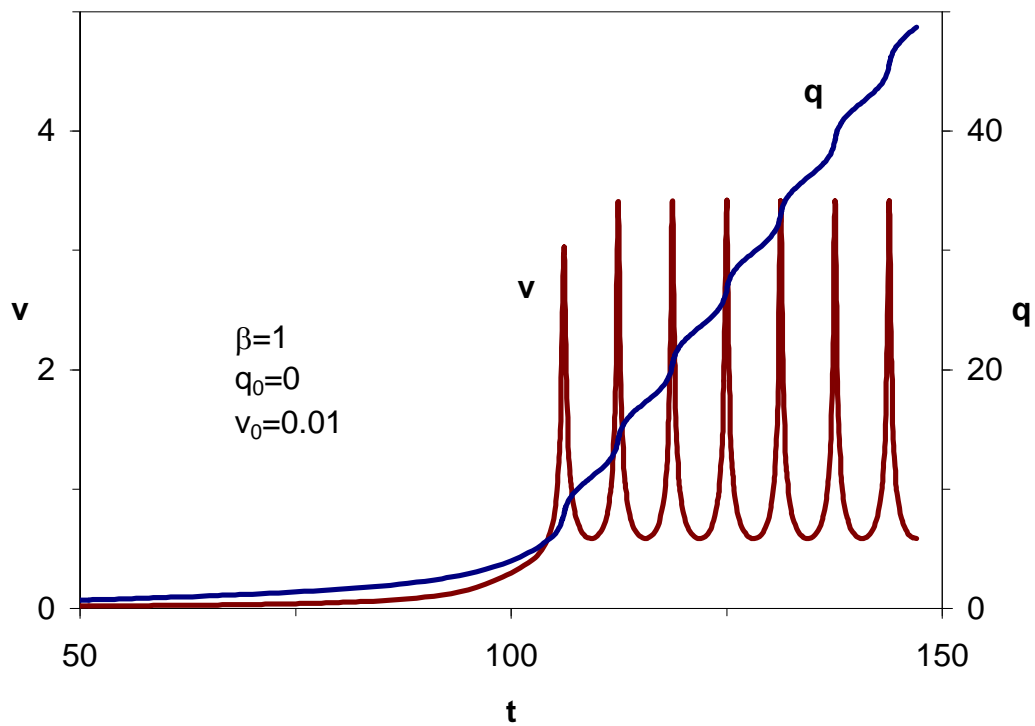


Рис. 3. Скорость производства v и количество накопленной информации q в колебательных режимах с разными частотами. Значения q_0 и v_0 как на рис. 1.

Уравнение Лагранжа:

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

Решение имеет вид:

$$v = \left(1 - \frac{e^{-\alpha q} \cos \beta q}{\sqrt{(1 - \alpha)^2 + \beta^2}} + C_1 e^{-q} \right)^{-1}, \quad t = q - \frac{e^{-\alpha q} \sin(\beta q - \operatorname{arctg}(\alpha / \beta))}{\sqrt{(\alpha^2 + \beta^2)[(1 - \alpha)^2 + \beta^2]}} - C_1 e^{-q} + C_2,$$

где

$$C_1 = e^{q_0} \left(\frac{1}{v_0} - 1 + \frac{e^{-\alpha q_0} \cos \beta q_0}{\sqrt{(1 - \alpha)^2 + \beta^2}} \right), \quad C_2 = C_1 e^{-q_0} - q_0 + \frac{e^{-\alpha q_0} \sin(\beta q_0 - \operatorname{arctg}(\alpha / \beta))}{\sqrt{(\alpha^2 + \beta^2)[(1 - \alpha)^2 + \beta^2]}}.$$

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:

$$\ddot{q} = \frac{\dot{q}^2}{q_c} \left(1 - \frac{\dot{q}}{\dot{q}_{\max}} \right), \quad (10)$$

где $\dot{q}_{\max} = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q}$ – максимальная скорость производства информации (выбрав соответствующий масштаб времени t_c , ее можно также записать в виде $\dot{q}_{\max} = q_c / t_c$). Вообще, инвариантными являются все полученные выше уравнения, если вместе с преобразованием времени $t \rightarrow kt$ осуществлять аналогичное преобразование характерного временного масштаба: $t_c \rightarrow kt_c$. Инвариантность очевидна из общего вида этих уравнений (в размерной форме)

$$\ddot{q} = \frac{\dot{q}^2}{q_c} \left(1 - \frac{\dot{q} t_c}{q_c} f(q) \right),$$

где f – некоторая функция.

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

Масштаб информации q_c наиболее просто оценить для режима с обострением, который характеризуется зависимостью $q(t) = q_0 - q_c \ln(1 - t/t_1)$ (записано в размерном виде). Считая, что вначале было $q_0 = 0$, нетрудно получить:

$$q_c = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} q(t) dt,$$

т.е. q_c совпадает с количеством информации, усредненным за весь период существования цивилизации от ее возникновения до момента сингулярности t_1 . При возрасте нашей цивилизации $t_1 \sim 10^6$ лет основной прирост информации до величины $\sim 10^{14}$ бит был получен за последний короткий период длительностью $\sim 10^2$ лет. Это дает оценку $q_c \sim 10^{14} \cdot 10^2 / 10^6 \sim 10^{10}$ бит.

6. ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА

Модели. Развитие цивилизации на современном этапе характеризуется «взрывным» ростом численности населения, который за последние полвека привел к ее удвоению. По разным прогнозам в текущем или следующем столетии численность может достичь 7 – 14 млрд. чел. Удержится этот уровень или пойдет вниз зависит от способности цивилизации обеспечить благоприятные условия своего существования. В связи с этим, насущной проблемой для судьбы человечества становится выявление законов развития цивилизации, которые могут повлиять на ход дальнейшего развития.

Попытки теоретического описания роста народонаселения, предпринятые в ряде работ (Капица, 1992, 1996; Подлазов, 2002; Найденов и Кожевникова, 2003), 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. Нелинейность связей не позволяет использовать принцип суперпозиции и суммировать вклады отдельных стран и регионов, а приводит к необходимости описывать демографический процесс для человечества в целом.

В работах Forster et al. (1960), Horner (1975), Капицы (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 обрывается в бесконечность, что дало повод для названия “the Doomsday model”.

Феноменологическая модель со стабилизацией была предложена в (Найденов и Кожевникова, 2003): $\dot{N} \sim N^2(1 - N/N_c)$. Эта модель встречается в популяционной динамике (Свирижев, 1987). Она характеризуется гиперболическим ростом при $N \ll N_c$, затем замедлением роста и выходом на асимптотическую стадию с постепенным приближением к предельной численности $N \rightarrow N_c$, которая, по оценкам (Найденов и Кожевникова, 2003), составляет $N_c = 7.4$ млрд. чел. Ожидается, что предельная численность будет достигнута в середине текущего века.

В предыдущем параграфе были получены нелинейные уравнения, управляющие эволюцией $q(t)$. После нахождения $q(t)$ численность производителей восстанавливается на основе (1). Заметим отдаленную аналогию с системой поле – частицы. Движение частиц генерирует поле. Точно так же функционирование производителей порождает информацию.

Полученные результаты в отношении скорости производства информации можно перенести на численность населения, имея в виду связь (1). Например, в режиме со стабилизацией, исходя из (10), получаем уравнение

$$\dot{N} = \frac{wN^2}{q_c} \left(1 - \frac{wN}{\dot{q}_{\max}} \right),$$

в котором 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 (скорость производства информации, количество накопленных знаний), которые конечно же каким-то образом зависят от биологических факторов (фертильность, смертность, возрастная структура и т.д.), а также от свойств 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. 1-3. Согласно (1), 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. Это согласуется с выводом работ (Капица, 1992, 1996; Подлазов, 2002) о том, что вся предшествующая история человечества протекала в режиме 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 информация производится с постоянной скоростью, а количество информации линейно растет со временем. В режиме с возвратом кривая $q(t)$ идет выше, чем в режиме со стабилизацией, за счет более высокой численности населения на промежуточном этапе эволюции (в области максимума).

Рис. 2 показывает, что с уменьшением показателя α максимальная численность $v_{\max} \approx 1/[-\alpha \ln(\alpha v_0)]$ может достигать больших значений, тогда как точка максимума сдвигается незначительно.

При $\alpha \rightarrow \alpha_1$ максимум вырождается: его величина падает до стационарного уровня, а точка максимума уходит на бесконечность. В пределе $\alpha \rightarrow \infty$ происходит переход к режиму со стабилизацией.

Рис. 3 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.

Рис. 4 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. Возможность такого изменения численности человечества 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:

$$\dot{N} = rN^2 \left(1 - \frac{N}{K(q)} \right), \quad (11)$$

где $r = w/q_c$ – коэффициент роста численности, $K(q)$ – мгновенная емкость среды – наибольшая численность, достижимая при данном уровне знаний q :

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

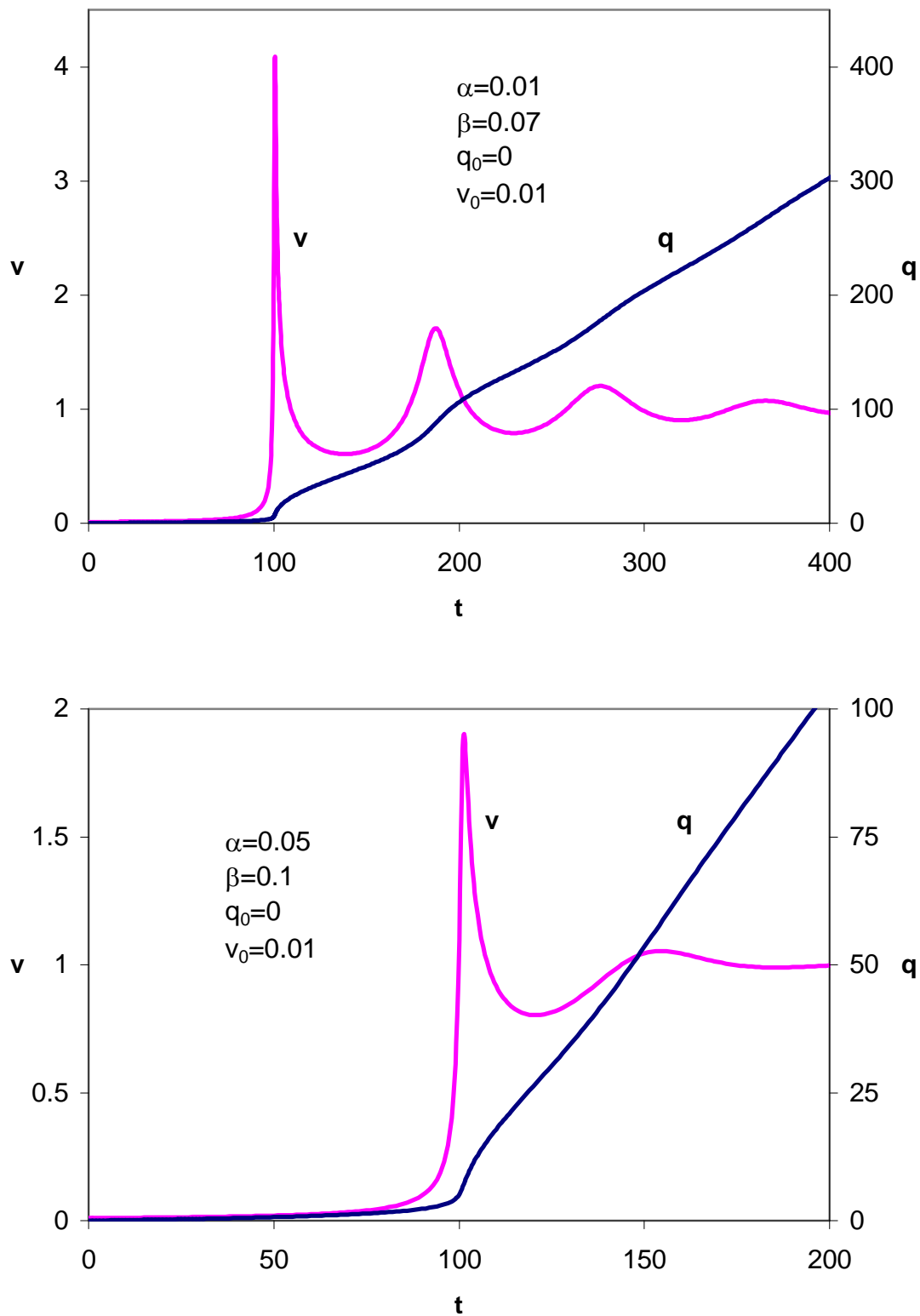


Рис. 4. Скорость производства и количество накопленной информации в двух разных режимах с затухающими колебаниями.

$N_c = q_c / (wt_c)$ – стационарная емкость среды – численность человечества, при которой биосфера и цивилизация устойчиво сосуществуют. Очевидно, $K(q) \rightarrow \infty$ при $q \rightarrow 0$ и $K(q) \rightarrow N_c$ при $q \rightarrow \infty$. Видно, что мгновенная емкость среды (12) может существенно превышать ее стационарное значение.

Мгновенная емкость среды определяется как отношение общего объема ресурсов R_0 к 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 и 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, а значит $R_0 = \text{const}$. Рост знаний q приводит (через появление новых технологий) к пропорциональному увеличению потребностей человека: $R_1 \sim q$. В итоге мгновенная емкость среды убывает по закону $K \sim q^{-1}$.

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. В стационарном состоянии рост знаний продолжается, обеспечивая рост обеих величин R_0 и R_1 одинаковыми темпами, так что их отношение остается постоянным:

$$K = \text{const} = N_c.$$

Соотношение (12) полностью согласуется с этими общими соображениями, как это видно из рассмотрения следующих характерных ситуаций.

Первая ситуация соответствует *слаборазвитой цивилизации* с малым запасом знаний: $q \ll q_c / \alpha$. В этом случае мгновенная емкость среды высока: $K(q) \approx N_c q_c / (\alpha q)$, 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. 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 $q \gg q_c / \alpha$ характеризует *высокоразвитую цивилизацию* с большим запасом знаний. Емкость среды для нее постоянна $K(q) = N_c$, численность населения также достигает уровня N_c , а прирост знаний идет с постоянной скоростью. Это состояние можно назвать *гомеостазисом* цивилизации. На данном этапе развития емкость среды полностью исчерпана, а популяция придерживается так называемой К-стратегии, характеризуемой низкой рождаемостью, низкой смертностью и высокой продолжительностью жизни.

Промежуточная ситуация: $q \sim q_c / \alpha$, 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 . Чем меньше значение параметра α , тем более опасный «перегрев» грозит популяции (превышение несущей способности биосферы) и тем значительнее будет последующий коллапс. На-

против, увеличение α постепенно снижает максимум, который исчезает при $\alpha = \alpha_1$. После этого динамика численности переходит в режим со стабилизацией, характеризуемый постепенным нарастанием численности до уровня плато N_c . Таким образом, параметр α характеризует внутреннюю управляемость цивилизации, ее способность самостоятельно погасить инерцию роста численности (кстати, обратная величина $1/\alpha$ как раз характеризует инерционность). Чем меньше управляемость α , 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 управляемость 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 управляемость α – вполне объективная характеристика цивилизации, зависящая от биологической природы человека и социальной структуры общества, но не зависящая от политической воли.

Альтернативная формулировка. Важно отметить, что демографическая динамика, описываемая уравнениями (11) и (12), может быть сформулирована 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 (1), нетрудно получить уравнение для K :

$$dK / dt = \alpha r N K (1 - K / N_c). \quad (13)$$

Вместе с уравнением (11), записанном в виде

$$dN / dt = r N^2 (1 - N / K),$$

получаем замкнутую систему для описания демографической динамики.

Уравнение (13) имеет вполне естественную интерпретацию: скорость изменения емкости среды должна быть пропорциональна наличному объему ресурсов (т.е. самой емкости), а также численности населения, которое использует и воспроизводит ресурсы; выражение в скобках учитывает принципиальную ограниченность ресурсов.

Калибровка модели. Проведем калибровку модели (11)–(12) по известным демографическим данным (Total Midyear Population, 2005). В качестве основы используем решение уравнения для режима с возвратом, которое включает в себя в качестве предельного случая $\alpha \rightarrow \infty$ режим со стабилизацией:

$$N / N_c = \left(1 - \frac{e^{-\alpha q}}{1 - \alpha} + C_1 e^{-q} \right)^{-1}, \quad t / t_c = q + \frac{e^{-\alpha q}}{\alpha(1 - \alpha)} - C_1 e^{-q} + C_2,$$

где C_1 и C_2 задаются выражениями (9), в которых $v_0 = N_0 / N_c$, N_0 – численность в начальный момент времени. Уравнения содержат 4 калибровочных параметра: t_c , N_c , α , q_0 , совокупность которых обозначим p . Для их нахождения используем метод наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^n [N_i - N(t_i; p)]^2 \rightarrow \min,$$

где N_i – значения численности в моменты времени t_i , n – размер выборки.

Для расчетов использовались демографические данные за период 1950 – 2004 гг. (более ранние данные не рассматривались из-за их низкой точности). Результаты калибровки модели представлены в таблице, а рассчитанные сценарии – на рис. 5.

Таблица. Результаты калибровки модели

№ решения	Standard deviation, s млн. чел.	Time scale, t_c лет	Steady state population size, N_c млрд. чел.	Inverse specific growth rate, $r^{-1} = N_c t_c$ млрд. чел.год	Intrinsic controllability of civilization, α	Initial quantity of information, q_0
1a	16.2	13.2	7.39	97.3	∞	0
1b	16.1	13.1	7.49	98.1	0.954	15.2
2	19.0	19.5	5.37	105	0.114	9.00
3	18.9	36.9	2.81	104	0.0261	16.0
4	102.6	20	10	200	1.81	0

В таблице приведено среднеквадратичное отклонение s теоретической кривой от демографических данных. Значения s для сценариев 1–3 соответствуют локальным минимумам на поверхности $s(p)$ (могут существовать и другие локальные минимумы). Сценарий 4 не отвечает локальному минимуму $s(p)$. Он имеет на порядок более высокое значение стандартного отклонения и рассмотрен здесь из-за его близости к существующим прогнозам роста численности населения.

Решение 1a получено для режима со стабилизацией, которому соответствует $\alpha \rightarrow \infty$, а значение q_0 может быть любым, так как в уравнение (8) q не входит. Решения 1b, 2, 3 отвечают режиму с возвратом. Решения 1a и 1b близки между собой, но существенно отличаются от решений 2 и 3. Однако произведение $N_c t_c$ изменяется незначительно. Среднее для решений 1–3 равно $N_c t_c = 101$ 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 таблице значения s (кроме сценария 4) примерно в 2–2.5 раза меньше s_d , т.е. точность модели выше точности демографических данных. По этой причине невозможно отдать предпочтение какому-либо одному решению из представленных в таблице. Все они описывают вполне возможные сценарии развития на ближайшую перспективу (которые, естественно, должны уточняться по мере получения новых демографических данных).

Сценарии роста. На рис. 5 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 7.0 млрд. чел., а затем примерно в течение трех веков численность будет снижаться до уровня 5.4 млрд. чел.

Сценарий 3 дает максимум около 7.0 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).

Сценарий 4 наиболее 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.

Прежде всего, можно сказать, что принятая для расчетов модель показывает широкий спектр возможностей дальнейшего хода численности, в том числе и сценарии, близкие к общепринятым. В то же время, наилучшее приближение к демографическим данным за период 1950–2004 гг. обеспечивают сценарии с менее интенсивным ростом и даже с возвратом к меньшей численности.

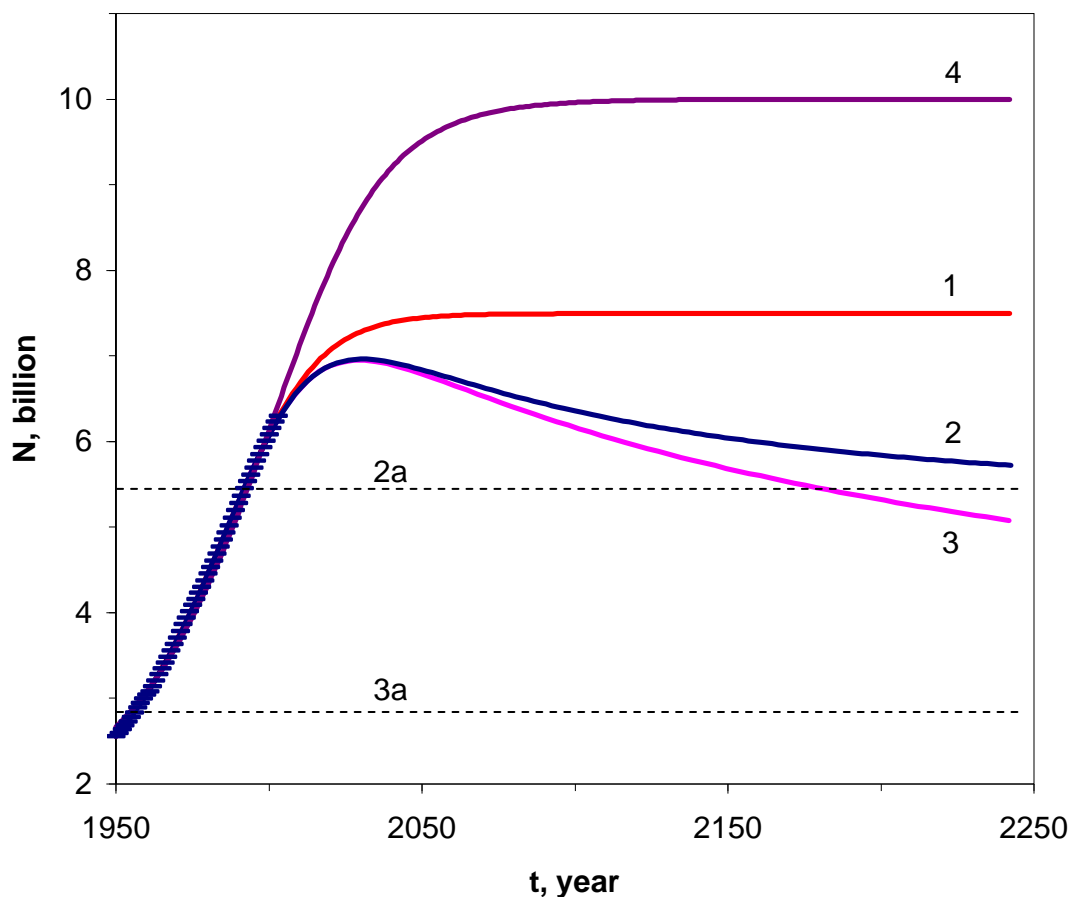


Рис. 5. Изменение численности населения с течением времени. Номер у кривой соответствует номеру решения в таблице. Кривая 1 соответствует решениям 1a и 1b, которые практически совпадают. Линии 2a и 3a показывают стационарные численности, к которым стремятся кривые 2 и 3 соответственно. Маркерами обозначены демографические данные.

Полученные результаты качественно согласуются с соображениями 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 численности, в результате которого, как показывают многие признаки, долговременная оптимальная несущая емкость Земли (по нашей терминологии, стационарная емкость среды) уже превышена. По оценкам Smail (2002) стационарная емкость среды не выше 2–3 млрд. человек, 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. человек (Smail, 2002). Расчеты показывают (сценарий 4), что такое поведение возможно. Между тем, другие сценарии (1–3) не исключают более быстрого торможения роста численности с последующим ее снижением. Все эти сценарии в той или иной степени удовлетворяют демографическим данным на интервале 1950–2004 гг., но дают существенное расхождение в недалеком будущем. Это может объясняться разными причинами. Прежде всего, некорректностью (в математическом смыс-

ле) обратной задачи – нахождения параметров модели по эмпирическим данным путем минимизации функционала невязки. Но есть и причина, связанная с самим характером демографического процесса. Дело в том, что в условиях высокой перенаселенности весьма 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, что является предметом будущих исследований.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ИНФОРМАЦИОННЫЙ ИМПЕРАТИВ

Как уже отмечалось, человечество почти до конца XX века развивалось в режиме с обострением. Эпоха гиперболического роста охватывает палеолит, неолит и исторический период, т.е. интервал времени длительностью 1.6 млн. лет. Формулы для производства информации и ее накопления в этом режиме были получены выше. Записывая их в размерном виде с учетом связи (1), найдем

$$N = N_c t_c / (t_1 - t), \quad q = q_0 - w N_c t_c \ln(1 - t / t_1),$$

где $t_1 = N_c t_c / N_0$.

Вблизи точки сингулярности t_1 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 окружающей среды (Люри, 2004). Такая ситуация характерна для зрелой, гомеостатической, цивилизации. Она имеет прямую аналогию с климаксовой экосистемой, в которой первичная продукция почти полностью компенсируется отмиранием биомассы (Wittaker, 1975).

Капица (1996) сформулировал 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 объему знаний q . Действительно, интегрирование в (2) при нахождении q сглаживает резкие изменения N , что особенно заметно в периоды обострений, когда N растет значительно быстрее, чем q (рис. 3).

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 объема накопленных человечеством знаний. Таким образом, знания выступают в качестве единственной движущей силы развития цивилизации.

Происходит это следующим образом. Накопление знаний способствует развитию бизнесберегающих 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 → бизнесберегающие технологии → рост про-

должительности жизни, увеличение численности населения, улучшение образования → рост производства новых знаний. Этот цикл обеспечивает нелинейный, самоускоряющийся характер процесса производства знаний.

Важная особенность процесса – это его неустойчивость. Сложная система, в которой не производится информация, оказывается структурно неустойчивой. Сколь угодно малое проявление самоорганизации в системе становится началом развития процесса с обострением, который в конечном итоге приводит к появлению цивилизации. Таким образом, возникновение жизни неизбежно, несмотря на возможную случайность появления первой самоорганизующейся флуктуации. Это согласуется с взглядами Тейяра де Шардена (1959), который постулировал появление разума в больших системах.

Еще Хёрнером (1972) была отмечена одна далеко идущая космологическая аналогия. Флуктуация в плоском мире Минковского приводит его в конечном итоге к расширяющейся вселенной де Ситтера с экспоненциально растущим радиусом $R \sim e^{Ht}$, где H – постоянная Хаббла (Пригожин и Стенгерс, 2000). Вводя величину $q \sim \ln R$, получим $\dot{q} = H$. В информационной динамике этому в точности соответствует постоянный режим производства информации, который, следовательно, можно рассматривать как информационный аттрактор, к которому приходит любая траектория независимо от начальных условий, т.е. возникшая в результате произвольной самоорганизующейся флуктуации. Этот аттрактор представляет собой гомеостатическую цивилизацию, которая сохраняет свою численность и одновременно наращивает информацию с постоянной скоростью. Поразительное сходство космологической и информационной динамики приводит к мысли об общих глубинных корнях этих явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов В.В. О законе возрастания сложности эволюционирующих систем. 2004.
<http://aicommunity.narod.ru/TheBase/KombEvol.html>
- Горшков В.Г. Запасы и потоки информации в биоте и цивилизации // Докл. РАН. 1996. Т. 350. № 1. С. 135-138.
- Горшков В.В., Горшков В.Г., Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С., Макарьева А.М. Информация в живой и неживой природе // Экология. 2002. № 3. С. 163-169.
- Дольник В.Р., 1992. Существуют ли биологические механизмы регуляции численности людей? // Природа, № 6, с. 3–16.
- Forster, von H., et al. Doomsday: Friday, 13 November, A.D. 2026 // Science, 1960, v.132, p.1291.
- Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам. М.: Мир, 1991. 240 с.
- Horner, von S., 1975. Population explosion and interstellar expansion // J. British Interplanetary Society, v.28, p.691.
- Jorgensen S.E., 1997. Integration of Ecosystem Theories: a Pattern, 2nd revised ed. Kluwer, London.
- Jorgensen S.E., 1999. State-of-the-art of ecological modelling with emphasis on development of structural dynamic models // Ecological Modelling, Vol. 120, p. 75–96.
- Капица С.П. Математическая модель роста народонаселения мира // Мат. моделирование. 1992. Т. 4. № 6. С. 65-79.
- Капица С.П. Феноменологическая теория роста населения Земли // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166. № 1. С. 63-80.
- Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего. М.: УРСС, 2003. 284 с.
- Keyfitz N., 1971. Population: Facts and methods of demography. Freeman, San Francisco.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: Наука, 1965. 204 с.
- Льюин Р. Гены. М.: Мир, 1987. 480 с.
- Люри Д.И. Траектории развития экологических кризисов // Докл. РАН. 2004. Т. 394. № 2. С. 252-254.

- Mohr P.J., Taylor B.N. CODATA recommended values of the fundamental physical constants. 1998. <http://www.physics.nist.gov/constants>
- Найденов В.И., Кожевникова И.А. Математические модели численности населения Земли // Докл. РАН. 2003. Т. 393. № 5. С. 591-596.
- Николис Дж. Динамика иерархических систем: Эволюционное представление. М.: Мир, 1989. 488 с.
- Подлазов А.В. Теоретическая демография. Модели роста народонаселения и глобального демографического перехода // Новое в синергетике: Взгляд в третье тысячелетие. М.: Наука, 2002. С. 324-345.
- Пригожин И., Стенгерс И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. М.: УРСС, 2000. 240 с.
- Северцов А.С. Динамика численности человечества с позиций популяционной экологии животных // Бюл. Моск. общества испытателей природы. Отд. биол. 1992. Т. 97. № 6. С. 3-17.
- Smail J.K., 2002. Confronting a surfeit of people: reducing global human numbers to sustainable levels // Environment, Development and Sustainability, Vol. 4, p. 21–50.
- Свирижев Ю.М. Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. М.: Наука, 1987. 368 с.
- Cambridge Encyclopedia of Human Evolution. / Ed. by S. Jones et al. Cambridge Univ. Press, 1994.
- Teilhard de Chardin P., 1959. Le Phénomène Human. Paris.
- Thomas C.D., 1990. // Nature, Vol. 347, p.237.
- Total Midyear Population for the World:1950-2050. 2005. <http://www.census.gov/ipc/www/worldpop.html>
- Что такое закон Мура? 2003. <http://www.intel.ru/intel/museum/history/hof/moore.htm>
- Уиттекер Р. Сообщества и экосистемы. М.: Прогресс, 1980. 327 с. (Wittaker R.H. Communities and Ecosystems. New York: Macmillan, 1975).
- Wood B., 1992. Origin and evolution of genus *Homo* // Nature, Vol. 355.
- World population prospects, 2005. The 2004 Revision // Population Newsletter, No.79, <http://www.unpopulation.org>.