

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ КОНТРОЛЯ ГЛОБАЛЬНОГО ДЕМОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

© 2009 Б.М. Долгоносов

Институт водных проблем РАН, г. Москва; e-mail: borismd@aqua.laser.ru

Цивилизация рассматривается как система, производящая знания. На этой основе разрабатывается модель глобальной демографической динамики, описывающая длительную эпоху гиперболического роста и современный переходный период, завершающийся установлением гомеостаза в системе цивилизация–биосфера.

Ключевые слова: *демографический процесс, информационная динамика, гиперболический рост, переходный период.*

Человечество состоит из отдельных взаимодействующих между собой популяций. Традиционный подход к описанию такого сообщества основывается на системе уравнений популяционной динамики, которую обобщенно можно представить в виде

$$dN_i / dt = F_i^{(1)}(N_i) + \sum_{j \neq i} F_{ij}^{(2)}(N_i, N_j) + \sum_{j, k \neq i} F_{ijk}^{(3)}(N_i, N_j, N_k) + \dots,$$

где функции F описывают внутривидовые процессы и межвидовые взаимодействия с разной степенью коллективности, N_i - численность i -й популяции. Данный подход требует спецификации вида функций F , а также знания параметров отдельных популяций и характеристик их взаимодействия, что составляет внушительный объем информации. Учитывая ее неточность и неизбежное накопление ошибок, вряд ли стоит ожидать приемлемой точности прогнозов при применении моделей такого рода. Практика моделирования подтверждает этот вывод. Для глобальных прогнозов более уместен другой подход, основанный на агрегированном описании. В этом случае обычные уравнения популяционной динамики могут оказаться непригодными из-за возникновения новых свойств при масштабном переходе. Для построения адекватной агрегированной модели надо рассматривать обобщенные свойства системы, контролируемые ход крупномасштабного демографического процесса. Таким свойством является производство знаний. Это утверждение основано на представлении о цивилизации как о системе, обладающей памятью и производящей знания, необходимые для выживания в сложном мире [4, 10].

Прежде, чем развивать эти представления, напомним тезис Т. Мальтуса о том, что «численность народонаселения неизбежно ограничивает-

ся средствами существования» [7]. В работе [6] приведенный тезис переформулирован следующим образом: «...рост численности человечества на каждый данный момент времени ограничен потолком несущей способности Земли, обусловленным наблюдаемым в данный момент времени уровнем развития жизнеобеспечивающих технологий». Это высказывание можно формализовать следующим образом. Пусть N_i - потолок несущей способности, медленно изменяющийся с ростом уровня развития технологий, а t - соответствующий (медленный) масштаб времени, отслеживающий изменение уровня технологий. При данном их уровне текущая численность человечества $n(\tau)$ может претерпевать значительные изменения, которые протекают намного быстрее, чем развитие технологий. Соответствующий масштаб времени τ существенно меньше масштаба t (рис. 1). Время τ будем называть локальным, а t - историческим, $t \gg \tau$. Локальные процессы, связанные с отклонением от потолка несущей способности и релаксацией к равновесию, описываются уравнением Ферхюльста $dn/d\tau = rn[1 - n/N(t)]$, где N_i играет роль несущей емкости среды. Проблема состоит в том, чтобы описать исторический процесс роста потолка несущей способности N_i . Именно в историческом масштабе времени проявляется информационная сущность цивилизации. Рассмотрим эту проблему более подробно.

Производство знаний осуществляется через рецепцию безусловной информации R , получаемой в виде сигналов из внешнего мира, и ее преобразование в ходе интеллектуальной деятельности в условную информацию q , которая и представляет собой знания (рис. 2). В результате происходит логарифмическое сжатие информации: $q \sim \ln R$ (здесь R и q - меры соответствующей информации). При данном уровне знаний q человечество способно распознавать $R \sim e^q$ состоя-

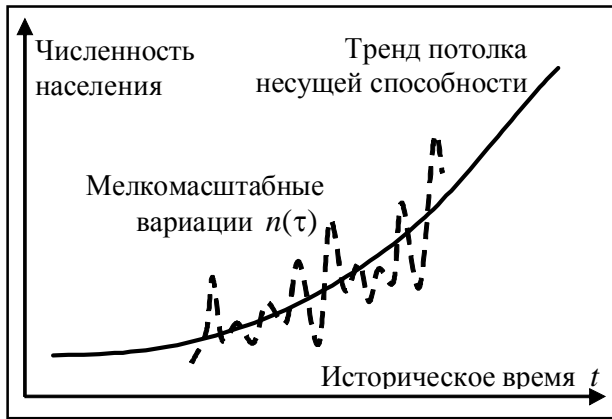


Рис. 1. Разномасштабные демографические процессы.

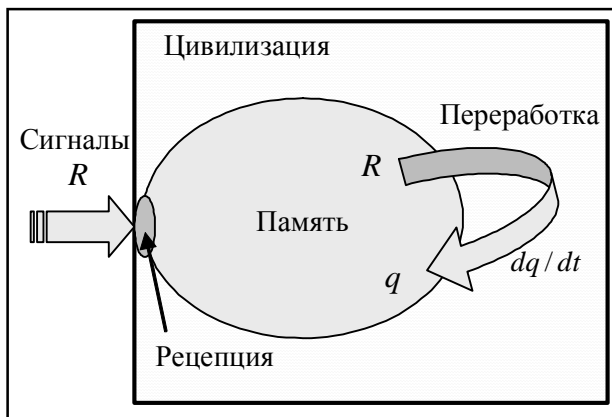


Рис. 2. Схема производства знаний.

ний внешнего мира. Рост знаний экспоненциально расширяет кругозор цивилизации и ее возможности в развитии жизнеобеспечивающих технологий, индуцирует процессы самоорганизации в обществе, в результате которых цивилизация развивается в направлении увеличения сложности своей структуры.

Условная и безусловная информация накапливается в памяти, которая может быть внутренней (генетическая и нейронная память) и внешней (книги, компьютеры, кинолента, образцы и пр.). Поскольку $R \gg q$ преобладающая часть памяти любого типа, но особенно внешней памяти на компьютерных носителях, заполнена именно сырой рецептируемой информацией. Проведем оценку разных типов памяти.

Генетическая память. Геном человека содержит $3 \cdot 10^9$ пар нуклеотидов (1 п.н. = 1 бит). При нынешней численности человечества примерно в 6.5 млрд. чел. общая генетическая память человечества составляет $2 \cdot 10^{19}$ бит.

Нейронная память. Мозг человека содержит $\sim 10^9 - 10^{11}$ нейронов (или бит, если считать нейрон элементарной ячейкой памяти с двумя состояниями) [1, 9]. Отсюда следует грубая оценка общей нейронной памяти человечества $\sim 10^{19} -$

10^{21} бит. Более точную оценку можно получить, если предположить, что нейронная память была равна по объему генетической в эпоху становления человека, когда гоминиды стали превышать по своему интеллекту животных такого же размера и типа питания. Это было примерно 5 млн. лет назад. Тогда объем мозга был в 4 раза меньше мозга современного человека. Объем генетической памяти за это время практически не изменился. Следовательно, в то время у гоминид нейронная память была равна генетической и составляла $3 \cdot 10^9$ бит/чел. В настоящее время нейронная память вчетверо больше этой величины: $1,2 \cdot 10^{10}$ бит/чел. Зная численность населения, нетрудно подсчитать, что сегодня общая нейронная память человечества около $8 \cdot 10^{19}$ бит.

Внешняя память. В настоящее время из разных видов внешней памяти преобладает память на компьютерных носителях. Грубую оценку можно получить, считая, что сейчас число компьютеров в мире порядка миллиарда, а память жесткого диска порядка 100 Гбайт $\sim 10^{12}$. Тогда общая память компьютеров $\sim 10^{21}$ бит. Другая оценка основана на подсчете произведенной информации. По данным исследователей из университета Беркли в 2002 г. человечеством было произведено информации $18 \cdot 10^{18}$ байт, при этом в четырех информационных средах сохранено $5 \cdot 10^{18}$ байт информации (печать - 0.01%, видео и кинолента - 7%, магнитные - 92% и оптические носители - 0.01%) [3, 5]. Переводя в биты, получим, что только в одном 2002 г. во внешней памяти накоплено $1,4 \cdot 10^{20}$ бит информации. Если учесть накопления за все годы до настоящего момента, то оценка $\sim 10^{21}$ бит покажется даже заниженной.

Таким образом, в настоящее время внешняя память как минимум на порядок превзошла нейронную. Проведенные оценки показывают, что всю историю человечества преобладала внутренняя память, и только с появлением и развитием персональных компьютеров (1980-е годы) внешняя память достигла уровня внутренней, а затем и превзошла ее (рис. 3). Это стало началом новой – информационной – эпохи. Переход к ней сопровождался качественными изменениями: если раньше суммарный объем памяти цивилизации рос пропорционально ее численности, то с преобладанием внешней памяти этот закон теряет свою силу. Теперь объем памяти можно быстро наращивать за счет внешних носителей.

Информационная эпоха длится всего несколько десятилетий. Вся же предшествующая продолжительная эволюция характеризовалась жесткой связью между памятью цивилизации и ее численностью: $R \sim N$. А так как $R \sim e^t$, то и $N \sim e^t$ – значит, всё это время не только объем информа-

ции, но и численность росла экспоненциально с накоплением знаний. Скорость производства знаний цивилизацией складывается из интеллектуальной деятельности индивидов, поэтому в целом она пропорциональна численности населения: $dq/dt = wN$, где w - средняя производительность человека. Отсюда следует уравнение производства знаний $dq/dt \sim e^q$, которое показывает, что процесс идет с обострением. Он сопровождается ускоренным развитием жизнеобеспечивающих технологий, вызывающим такой же ускоренный рост численности. Исходя из уравнения производства знаний и соотношения $q \sim \ln N$, нетрудно получить уравнение роста численности: $dq/dt = wN^2$, решение которого $N = [w(t_1 - t)]^{-1}$ дает известный гиперболический закон роста с моментом сингулярности $t_1 = 1/(wN_0)$ (где N_0 - начальная численность), который по оценкам первооткрывателей этого закона Х. фон Фёрстера, П. Моры и Л. Амиота [11] попадает на 2026 год (рис. 4).

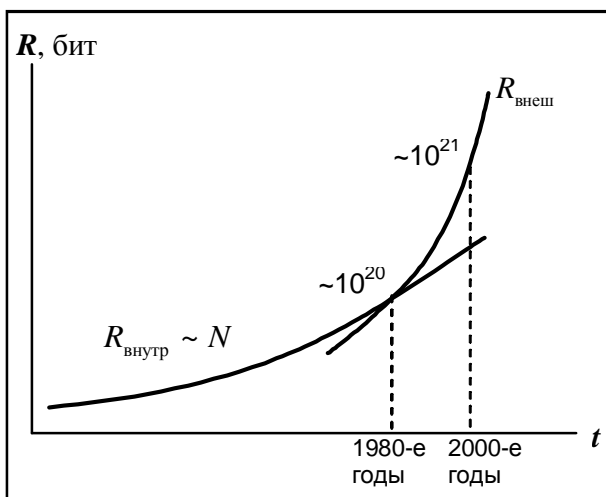


Рис. 3. Рост объема внутренней и внешней памяти.

Таким образом, оказывается, что гиперболический закон, обнаруженный указанными авторами эмпирически, имеет чисто информационную природу. В принципе, он должен выполняться для любой цивилизации, в которой свойства индивидов (объем памяти и скорость переработки информации) сохраняются, а накопление информации идет по внутренним каналам памяти.

Переход к информационной эпохе кардинально меняет ситуацию: информация начинает преимущественно накапливаться во внешней памяти. Характерно, что это происходит при приближении к точке сингулярности и совпадает с началом глобального экологического кризиса. Такое совпадение не случайно: оно связано с критическим явлением – преодолением порога перколяции (т.е. глобализацией), когда разрозненное

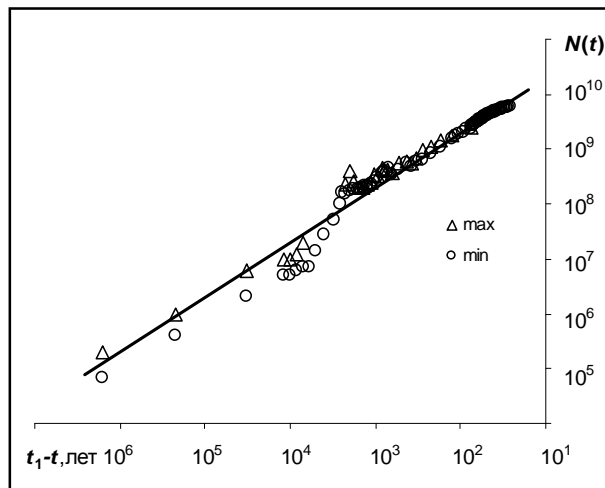


Рис. 4. Гиперболический закон роста численности населения Земли.

прежде человечество приобретает сильную связность, главным образом через потоки информации в мировой сети, а также через миграционные, финансовые, энергетические и материальные потоки. При этом связность между разными странами становится сопоставимой по величине со связностью внутри них. Для преодоления порога перколяции надо иметь возможность передавать информацию по каналам связи без ее носителей (людей), а это невозможно без развитой внешней памяти. Именно по этой причине начало информационной эпохи, глобализация и экологический кризис в планетарном масштабе совпадают по времени.

Возникновение экологического кризиса связано с исчерпанием не столько ресурсных, сколько регулятивных возможностей биосферы, обеспечивающей стабильность климата. Это знаменует конец длительной эпохи экстенсивного гиперболического роста цивилизации, переход к интенсивному развитию, торможению роста численности и, может быть, даже снижению численности до уровня, не разрушающего биосферу. В популяционной динамике эти ограничения обычно учитывают на основе представлений о несущей емкости среды K . Эта величина определяется как максимальный размер популяции, который может быть достигнут при заданных условиях. Используя это понятие, запишем уравнение популяционной динамики в переходный период

$$dN / dt = wN^2(1 - N / K). \tag{1}$$

Емкость среды представляет собой отношение общего объема ресурсов R_0 к средним потребностям одного человека R_1 , т.е. $K = R_0 / R_1$. Незрелое общество малой численности слабо влияет на ресурсную базу, поэтому $R_0 \approx \text{const}$. Рост знаний q приводит, через создание новых

технологий, к пропорциональному увеличению потребностей человека: $R_1 \sim q$. В итоге емкость среды, сначала очень большая, постепенно убывает по закону $K \sim 1/q$. В развитом обществе объем ресурсов R_0 растет с накоплением знаний благодаря формированию ресурсных циклов. Одновременно растут потребности человека R_1 ввиду увеличения стоимости жизни. По достижении стационарной численности населения рост знаний продолжается, поддерживая рост ресурсов R_0 и потребностей R_1 при постоянном их отношении: $K = \text{const}$.

Найдем зависимость $K(q)$, охватывающую оба крайних случая. Так как вся деятельность человечества по изучению материального мира направлена в конечном итоге на выявление и производство новых ресурсов, их общий объем растет вместе с накопленным объемом информации по степенному закону $R_0 \sim R^\alpha$, $\alpha > 0$ (основание этого закона – отдельная задача, которая требует привлечения теории алгоритмов). Так как $R \sim e^q$, то $R_0 = ce^{\alpha q}$, $c > 0$. Потребности человека R_1 растут линейно с увеличением общего объема ресурсов: $R_1 = a + bR_0$, где a и b – постоянные, $b > 0$. Линейность обусловлена преобладанием товаров массового потребления. Небольшие отклонения от линейности возникают лишь при учете предметов роскоши, которые потребляет немногочисленная элита. Для определения взаимосвязи между параметрами в линейном законе учтем, что человечество 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 $R_0 \rightarrow 0$, (остается только то, что есть в природе в готовом виде). Указанные условия в применении к выражению для R_1 дают $a + bc = 0$, или $a = -bc$. С учетом этого, выражение для R_1 можно представить в виде $R_1 = bc(e^{\alpha q} - 1)$. Составляя отношение R_0/R_1 найдем емкость среды

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

где введена демографическая емкость Земли $N_c \equiv 1/b$ к которой стремится K при безграничном росте знаний. Эта величина соответствует наибольшему размеру человеческой популяции, который может вынести биосфера планеты без ее необратимой деградации.

Скорость изменения емкости среды в процессе роста знаний человечества нетрудно определить, если продифференцировать по времени найденное соотношение для K и использовать связь $dq/dt = wN$. В результате получим

$$dK / dt = \alpha wNK (1 - K / N_c). \quad (2)$$

Отметим, что это уравнение не содержит какого-либо упоминания о количестве накопленных

знаний q , а оперирует только с переменными K и N . Оно имеет естественную интерпретацию, состоящую в том, что скорость изменения емкости среды пропорциональна, во-первых, самой емкости (т.е. наличному объему ресурсов), во-вторых, численности населения, которое использует и воспроизводит ресурсы, и, в-третьих, отклонению емкости от ее равновесного значения N_c .

На раннем этапе развития человечества размер популяции мал $N \ll N_c$, а емкость среды, напротив, велика $K \gg N_c$. Со временем численность растет, а емкость снижается. В конечном итоге достигается стационарное состояние, в $N = K = N_c$.

Система уравнений (1)-(2) описывает демографический переход, который происходит в настоящее время. Она содержит три параметра: α , w , N_c . Наблюдаемому гиперболическому росту (рис. 4) отвечает значение $w^{-1} = 200$ млрд. чел. лет. На рис. 5 этот режим роста описывается кривой 1. Сценарии переходного периода рассчитывались при разных значениях параметров N_c и α (табл. 1). Имеющимся демографическим данным не противоречат сценарии развития с разными значениями α . Как видно из таблицы, при малых α велика разница между максимальной численностью цивилизации N_{max} и ее стационарным уровнем N_c . Вблизи точки максимума планета сильно перенаселена, ее демографическая емкость значительно превышена, провоцируя драматическое падение численности. Иная ситуация при больших α . Промежуточный максимум отсутствует, а численность населения постепенно дорастает до демографической емкости Земли.

Продолжительность переходного периода характеризуется временным масштабом t_c , который связан с N_c соотношением $N_c t_c = w^{-1}$. В таблице представлены сценарии, упорядоченные по возрастанию t_c – от 20 до 2000 лет. Сценарий 2 близок к прогнозу ООН, по которому численность населения возрастет до 9.1 млрд. чел. к середине текущего века и продолжит увеличиваться дальше. Сценарий 8 дает максимум численности около 7 млрд. чел., достигаемый в 2014 г. После этого идет снижение численности, сначала быстрое, а затем медленное, в течение примерно 2000 лет.

Для ограничения числа возможных сценариев необходимо использовать независимые оценки демографической емкости N_c . В настоящее время человечество потребляет по оценкам [2, 12] около 20% планетарной биомассы, тогда как допустимое изъятие, не разрушающее биосферу, не превышает 1%. То же можно сказать и об антропогенном тепловыделении, которое состав-

Таблица 1. Параметры рассчитанных сценариев (N_{\max} - максимальная численность, достигаемая в момент t_{\max})

№ сценария	t_c , год	N_c , млрд.	α	N_{\max} , млрд.	t_{\max} , год
2	20	10	1.81	10	∞
3	25	8	1.28	8.27	2049
4	30	6.67	1.02	7.67	2033
5	40	5	0.709	7.25	2025
6	60	3.33	0.442	7.00	2020
7	100	2	0.251	6.87	2017
8	2000	0.1	0.0118	6.71	2014

ляет 15-23% от производства энергии всей биосферой при допустимом пороге в 1%. Если следовать этим оценкам, человечество уже примерно в 20 раз превысило допустимый предел мощности своей экономики и вышло за пределы устойчивости биосферы. Возврат к разумному хозяйствованию возможен при снижении на порядок численности населения [2, 8], т.е. до уровня $N_c \sim 0.1-1$ млрд. чел., который находится между сценариями 7 и 8. Таким образом, возможен вариант, когда численность населения достигнет максимума примерно в 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. Последующая более медленная стабилизация численности может занять от сотен до тысяч лет. Подчеркнем, что сценарии с радикальным изменением численности, если таковые реализуются, неизбежно будут сопровождаться крупномасштабными социальными катаклизмами вследствие дестабилизации окружающей среды, исчерпания ресурсов, неравномерности развития стран и ряда других факторов. Тем не менее, нельзя категорически утверждать, что радикальные сценарии неизбежны.

Проведенный анализ показывает, что единственной крупномасштабной движущей силой глобального демографического процесса являются знания. В эпоху роста с обострением именно количество накопленных знаний выступает в качестве ведущей медленной переменной, к которой подстраивается численность населения. Однако с началом действия глобальных ресурсных и экологических ограничений роль основного регулятора численности постепенно переходит от количества накопленных знаний к скорости их производства. Высокая скорость жизненно необходима для преодоления внутренних противоречий цивилизации и противостояния перманентно возникающим новым вызовам природы. При постоянной скорости производства знаний численность в конечном итоге стабилизируется на уровне

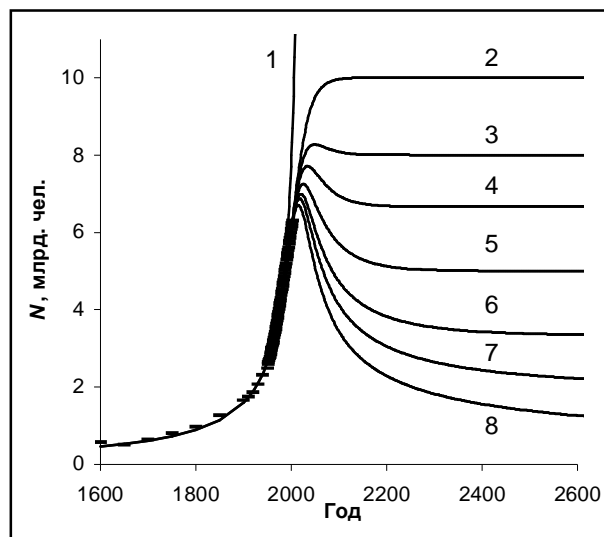


Рис. 5. Сценарии переходного периода. Параметры кривых см. в табл. 1.

не, обеспечивающем гомеостатическое сосуществование цивилизации и биосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блум Ф., Лейзерсон А., Хофстедтер Л. Мозг, разум и поведение. М.: Мир, 1988. 248 с.
2. Горшков В.Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ, 1995.
3. Губайловский В. Избыточность доступа // Что нового в науке и технике. 2005. № 5. С. 26–35.
4. Долгоносов Б.М. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов. М.: Либроком/URSS, 2009. 440 с.
5. Еремин А.Л. Ноогенез и теория интеллекта. Краснодар: Сов. Кубань, 2005. 356 с.
6. Малков А.С., Коротаев А.В., Халтурина Д.А. Математическая модель роста населения Земли, экономики, технологии и образования // Новое в синергетике: новая реальность, новые проблемы, новое поколение. М.: Наука, 2007. С. 148–186.
7. Мальтус Т. Опыт закона о народонаселении / Перевод И.А. Вернера. М.: Издание К.Т. Солдатенкова, 1895.
8. Поляков В.И. Неизбежность развития глобального экологического кризиса в XXI веке // Энергия. 2002. № 9. С. 42–49.
9. Хакен Г. Принципы работы головного мозга. М.: ПЕР СЭ, 2001. 351 с.
10. Dolgonosov B.M., Naidenov V.I. An informational framework for human population dynamics // Ecological Modelling. 2006. V. 198. P. 375–386.
11. Foerster H. von, Mora P.M., Amiot L.W. Doomsday: Friday, 13 November, A.D. 2026 // Science. 1960. V. 132. P. 1291–1295.
12. Vitousek P.M., Ehrlich P.R., Ehrlich A.N., Matson P.A. Human appropriation of the products of photosynthesis // BioScience. 1986. V. 36. P. 368–373.

INFORMATIONAL AND ECOLOGICAL MECHANISMS OF REGULATING THE GLOBAL DEMOGRAPHIC PROCESS

© 2009 B.M. Dolgonosov

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow
E-mail: borismd@aqua.laser.ru

Civilization is considered a system producing knowledge. On this basis a model of global demographic dynamics is developed to describe the long epoch of hyperbolic growth and the current transient period, completed by establishing a homeostasis in the civilization–biosphere system.

Key words: *demographic process, informational dynamics, hyperbolic growth, transient period.*