

УДК: 51-77

Мировая динамика как объект моделирования (к пятидесятилетию первого доклада Римскому клубу)

С. Ю. Малков^{1,a}, А. В. Коротаев^{2,3,b}, О. И. Давыдова^{4,c}

¹Центр долгосрочного прогнозирования и стратегического планирования МГУ имени М. В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

²Лаборатория мониторинга рисков социально-политической дестабилизации факультета социальных наук НИУ ВШЭ,

Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

³Факультет глобальных процессов МГУ имени М. В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

⁴ООО «АйДесайд Консалтинг»,

Россия, 141070, г. Королев, ул. Калинина, д. 6б, оф. 32

E-mail: ^a s@malkov.org, ^b akorotayev@gmail.com, ^c davydova.olga.msk@gmail.com

Получено 06.08.2022, после доработки — 23.10.2022.

Принято к публикации 31.10.2022.

В последней четверти XX века характер глобального демографического и экономического развития стал быстро изменяться: непрерывно ускорявшийся рост основных характеристик, имевший место на протяжении предыдущих двухсот лет, сменился на резкое их торможение. В условиях этих изменений возрастает роль долгосрочного прогноза мировой динамики. При этом прогноз должен основываться не на инерционном проецировании прошлых тенденций в будущие периоды, а на математическом моделировании фундаментальных закономерностей исторического развития. В статье изложены предварительные результаты исследований по математическому моделированию и прогнозированию мировой демографо-экономической динамики, основанные на таком подходе. Предложены базовые динамические уравнения, отражающие эту динамику, обоснована модификация этих уравнений применительно к разным историческим эпохам. Для каждой исторической эпохи на основе анализа соответствующей ей системы уравнений определялся фазовый портрет и проводился анализ его особенностей. На основе этого анализа делались выводы о закономерностях мирового развития в рассматриваемый период.

Показано, что для моделирования исторической динамики важным является математическое описание развития технологий. Предложен способ описания технологической динамики, на основе которого предложены соответствующие математические уравнения.

Рассмотрены три стадии исторического развития: стадия аграрного общества (до начала XIX века), стадия индустриального общества (XIX–XX века) и современная эпоха. Предложенная математическая модель показывает, что для аграрного общества характерна циклическая демографо-экономическая динамика, в то время как для индустриального общества характерен рост демографических и экономических характеристик, близкий к гиперболическому.

Результаты математического моделирования показали, что человечество в настоящее время переходит на принципиально новую фазу исторического развития. Происходит торможение роста и переход человеческого общества в новое фазовое состояние, облик которого еще не определен. Рассмотрены различные варианты дальнейшего развития.

Ключевые слова: моделирование, прогнозирование, глобальные процессы, прогноз мирового развития

Работа выполнена в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Математические методы анализа сложных систем» при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-61-46004).

UDC: 51-77

World dynamics as an object of modeling (for the fiftieth anniversary of the first report to the Club of Rome)

S. Yu. Malkov^{1,a}, A. V. Korotayev^{2,3,b}, O. I. Davydova^{4,c}

¹Center for Long-Term Forecasting and strategic planning of Moscow State University,
1 Leninskie gory st., Moscow, 119991, Russia

²Laboratory for Monitoring the Risks of Socio-Political Destabilization, Faculty of Social Sciences, HSE
University,

20 Myasnitskaya st., Moscow, 101000, Russia

³Faculty of Global Studies Moscow State University,
1 Leninskie gory st., Moscow, 119991, Russia

⁴Decide Consulting LLC,
office 32, 6b Kalinina st., Korolev, 141070, Russia

E-mail: ^a s@malkov.org, ^b akorotayev@gmail.com, ^c davydova.olga.msk@gmail.com

Received 06.08.2022, after completion — 23.10.2022.

Accepted for publication 31.10.2022.

In the last quarter of the twentieth century, the nature of global demographic and economic development began to change rapidly: the continuously accelerating growth of the main characteristics that took place over the previous two hundred years was replaced by a sharp slowdown. In the context of these changes, the role of a long-term forecast of global dynamics is increasing. At the same time, the forecast should be based not on inertial projection of past trends into future periods, but on mathematical modeling of fundamental patterns of historical development. The article presents preliminary results of research on mathematical modeling and forecasting of global demographic and economic dynamics based on this approach. The basic dynamic equations reflecting this dynamics are proposed, the modification of these equations in relation to different historical epochs is justified. For each historical epoch, based on the analysis of the corresponding system of equations, a phase portrait was determined and its features were analyzed. Based on this analysis, conclusions were drawn about the patterns of world development in the period under review.

It is shown that mathematical description of technology development is important for modeling historical dynamics. A method for describing technological dynamics is proposed, on the basis of which the corresponding mathematical equations are proposed.

Three stages of historical development are considered: the stage of agrarian society (before the beginning of the XIX century), the stage of industrial society (XIX–XX centuries) and the modern era. The proposed mathematical model shows that an agrarian society is characterized by cyclical demographic and economic dynamics, while an industrial society is characterized by an increase in demographic and economic characteristics close to hyperbolic.

The results of mathematical modeling have shown that humanity is currently moving to a fundamentally new phase of historical development. There is a slowdown in growth and the transition of human society into a new phase state, the shape of which has not yet been determined. Various options for further development are considered.

Keywords: modeling, forecasting, global processes, world development forecast

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2022, vol. 14, no. 6, pp. 1371–1394 (Russian).

This work has been carried out within the framework of the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow University “Mathematical Methods for the Analysis of Complex Systems” with the support of the Russian Science Foundation (project no. 20-61-46004).

Введение

Мы живем в эпоху перемен. Беспрецедентно быстрый мировой демографический и экономический рост, наблюдавшийся в середине XX века (рис. 1 и 2), сменился в последние десятилетия резким торможением (рис. 3).

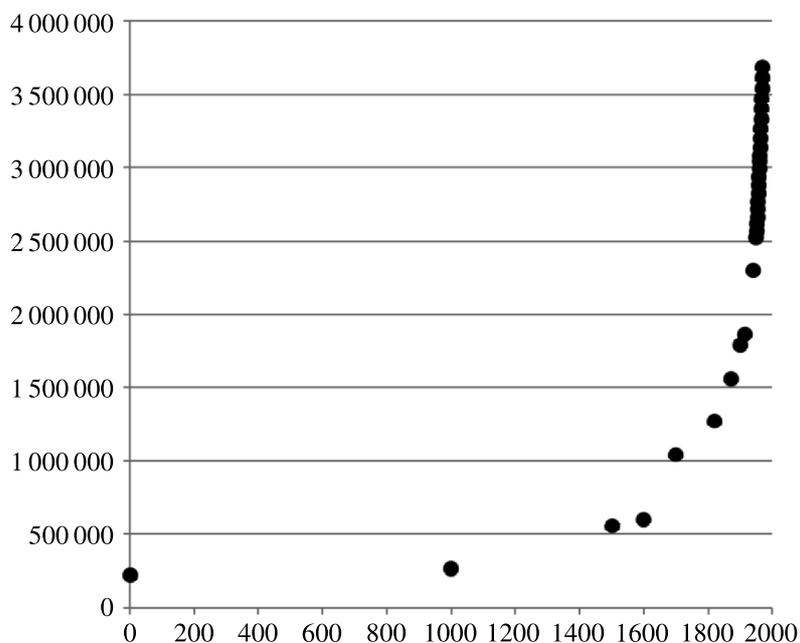


Рис. 1. Динамика численности населения мира с начала нашей эры до середины XX века (тыс. чел.) (источник данных: [Maddison, 2018])

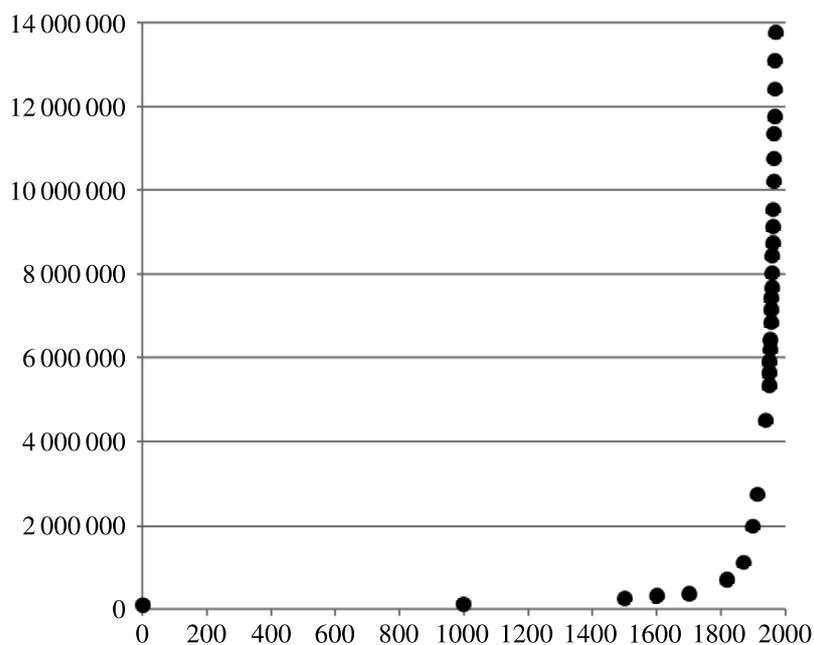


Рис. 2. Динамика мирового ВВП с начала нашей эры до середины XX века (млн долл. США, 1990 г.; источник данных: [Maddison, 2018])

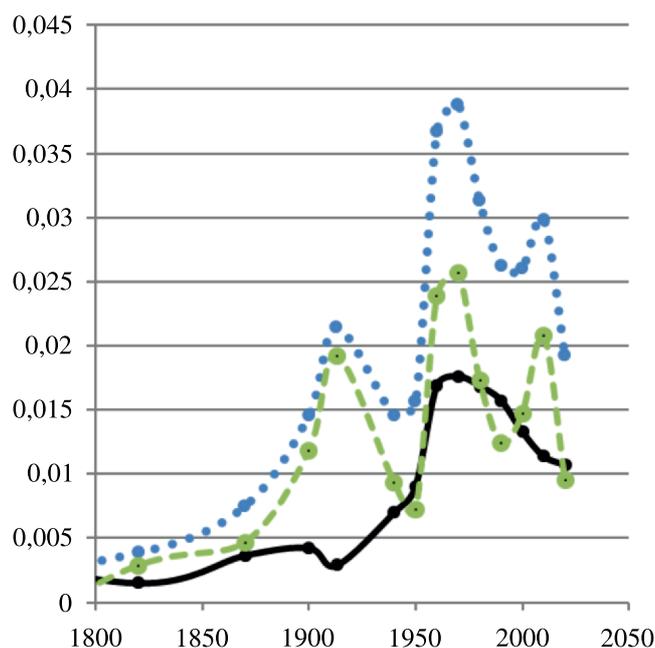


Рис. 3. Динамика усредненных по десятилетиям темпов относительного годового прироста численности населения Земли (сплошная линия), мирового ВВП (пунктирная линия) и среднемирового ВВП/чел. (штриховая линия)¹ (источник данных: [Maddison, 2018])

Естественно, возникают вопросы: чем обусловлены такие резкие изменения? чего следует ожидать в будущем? Для ответа на эти вопросы необходимы научные исследования. Между тем долгосрочное моделирование и прогнозирование мировой динамики — важная, но и чрезвычайно сложная область научных исследований (ввиду резких и неординарных изменений, происходящих в мире). Этой теме посвящено большое количество работ, содержащих модели глобальных демографических, экономических, социальных процессов (см., например, [UN Population Division, 2018; UN Population Division, 2022; Vollset et al., 2020; Hegre, Nygård, Landsverk, 2021; Wilson, 2016], а также обзор в [Садовничий и др., 2012]). При этом данные работы посвящены, как правило, отдельным аспектам мировой динамики. Комплексным подходом к моделированию и прогнозированию глобальных процессов отличаются доклады Римскому клубу [Доклады, 2022], имеющие полувековую историю. Наиболее интересные результаты получены с использованием математической модели «Мир-3» и ее последующих модификаций [Meadows et al., 1972; Randers, 2012; Randers et al., 2018]. Данная модель представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих долгосрочную динамику ряда глобальных переменных: численности народонаселения, уровня промышленного производства, количества невозобновляемых природных ресурсов, промышленных загрязнений природной среды и др. Особенностью модели является то, что правые части уравнений формируются и калибруются на основе эмпирических данных за последние несколько десятков лет (при этом поскольку эмпирические данные имеются в наличии далеко не всегда, то в этих случаях используются экспертные оценки). Кроме того, в модели «Мир-3» и ее последующих модификациях отсутствует социальный блок, поэтому не ясно, как влияет направленность социальных процессов на изучаемую динамику глобальных переменных. Результаты моделирования представляются в виде наборов графиков, отражающих

¹ На рис. 3 спад темпов роста населения в первой половине XX века связан с мировыми войнами, колебательная составляющая в динамике темпов роста мирового ВВП и среднемирового ВВП/чел. обусловлена кондратьевскими циклами. Подробная информация о трендовых и циклических составляющих в мировой демографической и экономической динамике представлена в работах [Садовничий и др., 2012; Садовничий и др., 2017].

динамику переменных во времени при фиксированных значениях параметров модели и заданных начальных данных. При таком представлении результатов моделирования в силу большого разнообразия получаемых графиков сложно понять картину в целом, сложно выявить ключевые «параметры порядка», от изменения которых в решающей степени зависит динамика системы. Поскольку ситуация в мире с течением времени изменяется, то изменяются и взаимосвязи между переменными. Это приводит к необходимости периодической апостериорной перенастройки модели и к изменению правых частей используемых в ней дифференциальных уравнений. Это в свою очередь затрудняет понимание того, как обеспечивается преемственность последовательных версий модели, как соотносятся друг с другом результаты расчетов, выполненных с применением этих версий.

Таким образом, хотелось бы, чтобы модель была более прозрачна, более удобна для анализа и при этом учитывала социальные процессы и влияние вариантов социального развития на динамику глобальных переменных.

Понятно, что сформулированные требования внутренне противоречивы: с одной стороны, есть желание сделать модель более комплексной (чтобы она учитывала социальные), а с другой стороны, есть желание сделать модель более прозрачной и удобной для анализа (чтобы можно было выявлять базовые закономерности и «параметры порядка», от которых в решающей степени зависит, по какому пути пойдет будущее развитие).

Ниже представлены результаты работ по созданию компактной модели, удовлетворяющей указанным требованиям. В силу имеющихся ограничений на объем статьи в ней описаны лишь блоки, предназначенные для моделирования демографо-экономической динамики, с косвенным учетом социальных факторов. Работы проводились в рамках исследований по моделированию и прогнозированию мировой динамики, проводимых в МГУ имени М. В. Ломоносова под руководством академиков В. А. Садовниченко и А. А. Акаева (см. [Садовнический и др., 2012; Садовнический и др., 2017; Малков и др., 2016] и др.).

Методология исследований

Исследование перспектив будущего развития мировой системы базировалось на следующих методологических предпосылках.

- Происходящие в мире изменения носят фундаментальный и долгосрочный характер, поэтому они должны рассматриваться в широком историческом контексте (а не просто как продолжение тенденций XX века). «Лицом к лицу лица не увидать. Большое видится на расстоянии» (С. Есенин). Соответственно, при моделировании мировой динамики должен быть реализован исторический подход: взгляд на современную ситуацию как на определенную стадию макроисторического развития, как на определенный этап исторической трансформации мировой системы.
- При таком подходе на первый план в качестве важнейшего фактора человеческой истории выходит технологическое развитие, которое в конечном итоге влияет на все сферы жизни: на экономику, демографию, социальные и политические взаимодействия. При этом технологическое развитие происходит не равномерно, а рывками (принимающими вид «технологических революций»), что предопределяет неравномерность исторического процесса.
- В соответствии с этим объектом исследования и моделирования являются базовые процессы, определяющие особенности динамики ключевых демографических, экономических и других характеристик на рассматриваемых стадиях исторического развития. Соответственно, моделирование проводится на высоком уровне агрегации; целью моделирования

является не столько определение конкретных значений переменных, сколько логика их долгосрочной динамики. Результаты моделирования при таком подходе целесообразно представлять не в виде графиков, отражающих изменение во времени значений тех или иных переменных в рамках конкретных сценарных условий, а с помощью фазовых портретов, отражающих картину в целом. Анализ динамики фазовых портретов позволяет выявить «параметры порядка» (то есть ключевые факторы, от которых зависит вид фазового портрета) и характеристики устойчивости экономического и социального развития на рассматриваемых стадиях исторического развития (на основе анализа условий, при которых происходит кардинальная трансформация фазового портрета).

Для реализации данного подхода к анализу и моделированию мировой динамики осуществлялась следующая последовательность действий:

- были предложены базовые уравнения, характеризующие демографическую и экономическую динамику с учетом развития технологий; был проведен анализ того, как модифицируются эти уравнения на разных стадиях исторического развития с учетом особенностей рассматриваемой эпохи;
- для каждой стадии исторического развития на основе анализа соответствующей ей системы базовых уравнений был определен фазовый портрет и проведен анализ его особенностей; на основе этого анализа делались выводы о закономерностях мировой динамики в рассматриваемую эпоху.

Основной проблемой, с которой пришлось столкнуться в ходе исследований, являлась чрезвычайная многопараметричность рассматриваемой предметной области. Стремление учесть разнообразные детали с неизбежностью требовало введения дополнительных параметров и соотношений в систему уравнений, что делало ее непрозрачной и сложной для анализа. Поэтому важнейшей задачей исследования была задача максимально возможного снижения размерности системы базовых уравнений путем выделения наиболее значимых процессов, определяющих долговременную динамику. Уравнения модели конструировались с целью фиксации наиболее важных закономерностей этих процессов. Также при построении и анализе фазовых портретов использовалась теорема А. Н. Тихонова [Тихонов, 1952], позволяющая путем разделения переменных модели на «быстрые» и «медленные» сделать этот анализ более прозрачным и выявить наиболее важные моменты.

Реализация методического подхода

Ниже приведены *базовые* уравнения, использовавшиеся для анализа и моделирования демографо-экономической динамики в различные исторические периоды.

1. Базовые уравнения блока «Демография» (Дм)

Базовое уравнение *демографической* динамики (характеризует изменение численности конкретного общества в результате динамики процессов рождаемости и смертности¹):

$$\frac{dN}{dt} = (\text{рождаемость}) - (\text{смертность}) \approx r \cdot N \cdot G(x_0, x). \quad (1)$$

Выражение $G(x_0, x)$ в правой части уравнения (1) характеризует зависимость прироста населения (то есть разницы между рождаемостью и смертностью) от уровня благосостояния (x —

¹ Для упрощения считается, что миграционными процессами можно пренебречь. При необходимости члены, учитывающие миграционные процессы, могут быть добавлены в правую часть уравнения (1).

материальный продукт, приходящийся на душу населения); x_0 — уровень «прожиточного минимума» (физического выживания): при снижении уровня материального обеспечения ниже x_0 смертность начинает превышать рождаемость. График производной $\frac{dN}{dt}$ как функции x в зависимости от характера выражения $G(x_0, x)$ может иметь разный вид, что является следствием влияния на демографические процессы социальных факторов (см. рис. 4).

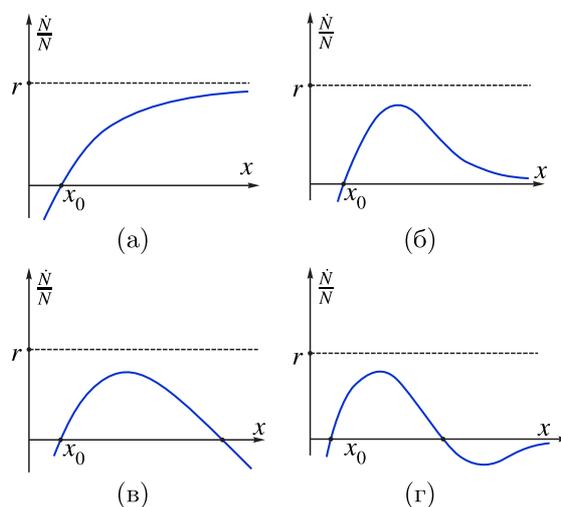


Рис. 4. Различные варианты зависимости относительного прироста населения $\frac{\dot{N}}{N}$ от уровня благосостояния x (где \dot{N} — производная величины N по времени)

Зависимость относительного прироста населения от величины x , изображенная на рис. 4, а, характерна для доиндустриального общества. Для развитых индустриальных обществ с высоким уровнем урбанизации характерны зависимости, изображенные на рис. 4, б и 4, в, характеризующие вторую фазу демографического перехода, когда одновременно с повышением уровня благосостояния происходит снижение рождаемости (переход от многодетной к малодетной модели семьи). Зависимость, изображенная на рис. 4, г, отражает ситуацию, характерную, например, для современных скандинавских стран, когда после периода падения рождаемости происходит ее восстановление, а демографическая динамика приближается к режиму простого воспроизводства.

2. Базовые уравнения блока «Экономика» (Эн)

Базовое уравнение **экономической** динамики (характеризует динамику уровня материального благосостояния членов общества):

$$\frac{dx}{dt} = (\text{производство потребительской продукции}^1 \text{ на душу населения}) - (\text{потребление на душу населения}). \quad (2)$$

Если в долгосрочном периоде темпы производства потребительской продукции опережают темпы потребления, то благосостояние растет, в противном случае благосостояние падает.

В рамках базовой модели конкретизация правой части выражения (2) производится по следующему алгоритму:

¹ Потребительская продукция включает в себя как продукцию повседневного спроса (питание, одежда, обувь и т. п.), так и продукцию длительного пользования (жилища, средства передвижения и т. п.).

- сначала определяется величина валового внутреннего продукта (общий объем производимой продукции в обществе, включая непотребительскую продукцию);
- далее из этой величины вычитается непотребительская продукция (то есть то, что домашние хозяйства не потребляют непосредственно) и получившийся результат делится на количество населения; то, что получилось, — производство потребительской продукции на душу населения;
- затем определяется средняя величина расходования потребительской продукции на душу населения с учетом амортизации продукции длительного пользования.

В общем виде выражение (2) может быть представлено следующим образом [Малков, 2009]:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{F(R^-, I_1, S) - I_1 - I_2}{N} - Q, \quad (3)$$

где $F(R^-, I_1)$ — производственная функция (общее количество конечной продукции, произведенное в единицу времени); R^- — природные ресурсы, используемые в процессе производства в единицу времени; S — уровень развития технологий; I_1 — часть произведенной продукции, используемая в инвестиционных целях (для обеспечения следующих циклов производства); I_2 — часть произведенной продукции, используемая в целях, непосредственно не связанных с будущим производством или потреблением (используемая, например, в целях улучшения экологических условий, улучшения транспортной инфраструктуры, систем жизнеобеспечения и т. п.); Q — расходование потребительской продукции.

Количество продукции F (производственная функция), произведенное в обществе в единицу времени, зависит от количества производителей, используемых ими средств труда и технологий, наличия необходимых природных ресурсов. Качественно отличаются ситуации, когда: 1) ограничения по ресурсам отсутствуют (ресурсы доступны в избытке); 2) когда ресурсы в дефиците.

В первом случае количество произведенной продукции определяется количеством производителей, средствами труда и технологиями (ресурсы не являются ограничением). Тогда производственная функция может быть записана в виде

$$F = A_R(S) \cdot V, \quad (4)$$

где V — количество производственных единиц (одна производственная единица — это количество производителей и сопряженных с ними средств труда, необходимых для переработки одной единицы ресурса в конечный продукт); $A_R(S)$ — коэффициент, зависящий от уровня технологий (чем больше значение $A_R(S)$, тем большее количество конечного продукта производится из одной единицы ресурса). Таким образом, в рассматриваемом случае рост производства будет иметь место, если увеличивается количество производственных единиц V и/или растет производительность труда.

Во втором случае определяющим является наличие ресурсов, при этом количество производственных единиц V имеется в избытке и они задействованы не полностью. В соответствии с этим в базовой модели производственная функция F может быть записана в виде

$$F = A_R(S) \cdot R^-, \quad (5)$$

где R^- — количество единиц природных ресурсов, используемых в процессе производства в единицу времени; $A_R(S)$ — коэффициент, зависящий от уровня технологий. Таким образом, в рассматриваемом случае рост производства будет иметь место, если увеличивается количество ресурса, используемого в производстве, и/или растет эффективность его использования.

С учетом вышесказанного результирующее выражение для производственной функции F , объединяющее оба случая, может быть записано в виде

$$F = \min \{A_R(S) \cdot V; A_R(S) \cdot R^-\}, \quad (6)$$

то есть в качестве F выбирается минимальное из выражений (4) и (5).

Произведенная в текущем временном периоде продукция далее используется:

- а) на обеспечение производства продукции в следующие периоды (I_1 — инвестиционные затраты, включая амортизацию старых и создание новых средств производства, возобновление/сохранение/увеличение ресурсной базы для производства, создание/совершенствование производственных технологий, профессиональное обучение);
- б) на преобразование внешней среды с целью создания комфортных/приемлемых условий для жизнедеятельности (I_2 — затраты на жизнеобеспечивающую инфраструктуру (ЖКХ, жилищное строительство, транспорт и транспортная инфраструктура), на обеспечение приемлемых свойств внешней среды (экология, утилизация отходов жизнедеятельности, удержание характеристик среды в приемлемых пределах));
- в) на потребление в широком смысле слова, то есть на обеспечение жизненного цикла конкретных членов общества (Q — затраты на питание, одежду, здравоохранение, образование, воспитание).

Функция $A_R(S)$ в уравнениях (4)–(6) определяется на основе статистических данных.

3. Базовые уравнения блока «Технологии» (Tx)

Нобелевский лауреат М. Кремер предложил формулу для динамики уровня развития технологий S в виде [Kremer, 1993]

$$\frac{dS}{dt} \approx c \cdot S \cdot N. \quad (7)$$

Смысл формулы (7) следующий: относительный прирост количества технологических инноваций пропорционален количеству изобретателей, которые составляют определенный процент от общей численности населения N . Коэффициент c интерпретируется М. Кремером как «коэффициент изобретательской продуктивности», значение которого зависит от социальных факторов и изменяется в разные исторические периоды в достаточно широком диапазоне (см. рис. V.12 из работы [Коротаев, Малков, Халтурина, 2019]).

А. В. Коротаев и его коллеги в работе [Коротаев, Малков, Халтурина, 2019] предложили в качестве количественного показателя, отражающего уровень развития технологий S , рассматривать величину производства ВВП на душу населения, а также ввести переменную

$$S' = S - m, \quad (8)$$

где m — постоянный коэффициент, играющий роль «прожиточного минимума» — доли произведенного продукта, строго направляемого на поддержания достигнутой численности населения. Таким образом, величина S' имеет смысл «ресурса на душу населения, который может быть потрачен на дополнительные цели — расширенное воспроизводство населения, науку, искусство, развлечения и пр.» [Коротаев, Малков, Халтурина, 2019]. Соответственно, уравнение (7) предложено записать в виде

$$\frac{dS'}{dt} \approx c \cdot S' \cdot N = c \cdot N \cdot (S - m). \quad (9)$$

Формула (9) ставит технологический прогресс в зависимость от наличия в обществе *избытка* ресурсов сверх «прожиточного минимума» m , то есть считается, что чем беднее общество, тем меньше в нем изобретательская активность.

С учетом данных соображений базовое уравнение для технологического прогресса может быть записано в виде

$$\frac{dS}{dt} \approx c \cdot N \cdot (S - S_0) = c \cdot N \cdot S \cdot \left(1 - \frac{S_0}{S}\right), \quad (10)$$

где в качестве количественного показателя уровня развития технологий S используется величина производства ВВП на душу населения, а S_0 — часть ВВП на душу населения, необходимая для обеспечения «прожиточного минимума». В отличие от величины m в формуле (9) величина S_0 в формуле (10) не является постоянной, она изменяется от эпохи к эпохе и последовательно растет, поскольку чем более сложным является общество, тем больше требуется усилий и средств для создания базовых условий для поддержания жизнедеятельности¹.

Описание процессов функционирования социальных систем на языке дифференциальных уравнений (1), (3), (10), описывающих механизмы изменения ключевых характеристик, и последующее построение фазовых портретов позволяют понять закономерности эволюции данных систем, а также особенности социальной самоорганизации, параметры устойчивых состояний (если таковые существуют), границы и характер устойчивости, а также условия, при которых устойчивые состояния исчезают.

Моделирование мировой динамики

Изложенный выше подход был использован для моделирования макроисторической динамики и анализа вариантов дальнейшего мирового развития. Ниже представлен краткий обзор результатов исследований. Последовательно рассмотрены доиндустриальная стадия исторического развития (аграрное общество), индустриальная стадия и наступающая постиндустриальная стадия.

1. Моделирование аграрного общества

1.1. Типологическими чертами аграрных обществ доиндустриальной стадии исторического развития являются следующие:

- основным видом производственной деятельности аграрного общества является сельскохозяйственное производство (земледелие и/или животноводство);
- основным ресурс R — земля, при этом площадь плодородных земель ограничена;
- основной производственной единицей является домашнее хозяйство: семья, обрабатывающая участок земли определенной площади; преобладает натуральное хозяйство, основной целью сельскохозяйственного производства домашнего хозяйства является собственное потребление;
- демографическая динамика характеризуется зависимостью, изображенной на рис. 4, а.

¹ Например, жизнь в городе требует намного больше базовых затрат, чем жизнь в сельской местности (включая затраты на централизованное водоснабжение, канализацию, дороги, транспорт и т. п., без которых жизнь в крупном городе невозможна).

С учетом вышесказанного базовые уравнения (1), (3), (10) модели «Дм–Тх–Эн» для типового аграрного общества приобретает следующий вид.

1.1.1. Обобщенное уравнение демографической динамики.

Базовое уравнение (1), отражающее характер демографической динамики, характерный для аграрного общества и изображенный на рис. 4, *a*, может быть записано в виде

$$\frac{dN}{dt} \approx r \cdot N \cdot \left(1 - \frac{x_0}{x}\right). \quad (11)$$

В соответствии с этим уравнением, если средний уровень благосостояния в обществе x снижается ниже критического значения x_0 , начинается процесс депопуляции (из-за аномального роста смертности), в обратном случае, когда $x > x_0$, происходит рост населения (прежде всего вследствие снижения детской смертности при высокой фертильности).

1.1.2. Обобщенное уравнение экономической динамики.

Для аграрного общества основным производимым продуктом является сельскохозяйственная продукция, предназначенная для потребления (прежде всего продукты питания). Непродовольственная продукция в общем выпуске составляет малую долю. Соответственно, в первом приближении величиной I_2 можно пренебречь и считать, что основной вклад в величину I_1 вносит посевной фонд (то есть часть урожая, резервируемая крестьянами для посева в будущем году). То есть уравнение (3) принимает вид

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{F(R^-, I_1) - I_1}{N} - Q \approx \frac{F(R^-, I_1) - I_1}{N} - q \cdot x, \quad (12)$$

где $q \cdot x$ — потребление (предполагается, что потребление пропорционально накоплениям: чем больше материальных благ x , тем больше их потребление; q — коэффициент пропорциональности).

При анализе экономической динамики в аграрном обществе необходимо рассматривать ситуации, когда: 1) ограничения по ресурсам отсутствуют (ресурсы доступны в избытке); 2) когда ресурсы в дефиците.

В первом случае плотность населения низкая, земля не является дефицитом. Общее производство (собираемый урожай) зависит от количества производственных единиц (домохозяйств), их трудозатрат, от плодородия земли и от того, какую площадь земли¹ в среднем обрабатывает одно домохозяйство. Соответственно, в этом случае

$$F = A_R(S) \cdot V = \gamma \cdot R' \cdot N, \quad (13)$$

где R' — средняя площадь обрабатываемых угодий на душу населения, γ — урожайность.

Во втором случае плотность населения высокая, земля является дефицитом. Общее производство (собираемый урожай) зависит лишь от общей площади обрабатываемой земли и от урожайности. Соответственно, в этом случае

$$F = A_R(S) \cdot V = \gamma \cdot R_0, \quad (14)$$

где R_0 — общая площадь обрабатываемых угодий.

Соответственно, в первом случае уравнение (12) принимает вид

$$\frac{dx}{dt} \approx \gamma' \cdot R' - q \cdot x, \quad (15)$$

¹ Считается, что в условиях отсутствия дефицита земли площадь участка, который обрабатывает домохозяйство, определяется потребностями и физическими возможностями домохозяйства.

где γ' — урожайность за вычетом посевного фонда. При этом уровень благосостояния превышает величину x_0 и равен $x_1 = \frac{\gamma' \cdot R'}{q}$.

Во втором случае уравнение (12) принимает вид

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{\gamma' \cdot R_0}{N} - q \cdot x. \quad (16)$$

Видно, что если в первом случае доходы на душу населения постоянны, то во втором случае они уменьшаются по мере роста населения. Критическим параметром (параметром порядка) перехода от режима (15) к режиму (16) и обратно является численность населения в рассматриваемом обществе: если $N < \frac{R_0}{R'}$, то реализуется режим (15), в обратном случае — режим (16).

1.1.3. Обобщенное уравнение технологической динамики.

В базовой модели считается, что в аграрном обществе производство осуществляется на основе традиционных технологий, производительность труда если и растет, то весьма медленно. В соответствии с этим приближенно можно считать, что

$$\frac{dS}{dt} \approx c \cdot N \cdot S \cdot \left(1 - \frac{S_0}{S}\right) \approx 0. \quad (17)$$

Поскольку технологии в аграрном обществе влияют в основном на величины γ и R' , то эти величины в типовых случаях можно считать постоянными.

1.2. В соответствии с (11)–(17) фазовый портрет типового аграрного общества имеет вид, изображенный на рис. 5.

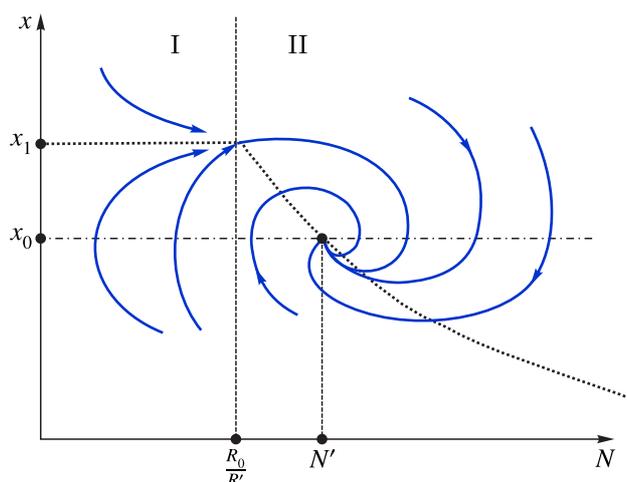


Рис. 5. Фазовый портрет типового аграрного общества (стрелками обозначены фазовые траектории, пунктирная линия — изоклина горизонтальных касательных, штрихпунктирная линия — изоклина вертикальных касательных)

Область I на фазовом портрете на рис. 5 (при $N < \frac{R_0}{R'}$) соответствует ситуации отсутствия ограничений по земельным ресурсам, область II на фазовом портрете (при $N > \frac{R_0}{R'}$) соответствует ситуации дефицита земельных ресурсов. В области I равновесное значение x_1 превышает критический уровень выживания x_0 , поэтому в соответствии с (11) численность населения растет. Однако при этом неизбежен переход в область II, где система имеет устойчивое состояние равновесия (аттрактор типа «устойчивый фокус») с координатами $x' = x_0$ (то есть это общество низкого достатка) и $N' = \frac{\gamma' \cdot R_0}{x_0 \cdot q}$ (N' — это демографическая емкость территории¹). При этом

¹ При этом надо иметь в виду, что демографическая емкость территории может расти (а аттрактор — смещаться в сторону более высоких значений N), если увеличивается производительность труда или растет урожайность γ .

видно, что в области II увеличение N приводит к уменьшению x , и наоборот (то есть N и x находятся в обратно пропорциональной зависимости). Это приводит к «мальтузианской ловушке» (то есть к невозможности проживания на конкретной территории населения, численность которого превышает демографическую емкость N' этой территории) и к *демографическим циклам* (колебаниям численности населения). Основная причина демографических циклов заключается в том, что демографический рост в условиях неизменной (или медленно растущей) ресурсной базы сопровождается снижением благосостояния x основной массы населения вплоть до уровня физического выживания x_0 , вследствие чего резко возрастает социальная напряженность, которая в конечном итоге приводит к социальному взрыву и гражданской войне¹. Основным результатом гражданских войн с демографической точки зрения является быстрое снижение численности населения до уровня, меньшего N' , что в свою очередь приводит к увеличению x выше критического уровня x_0 и к запуску нового демографического цикла.

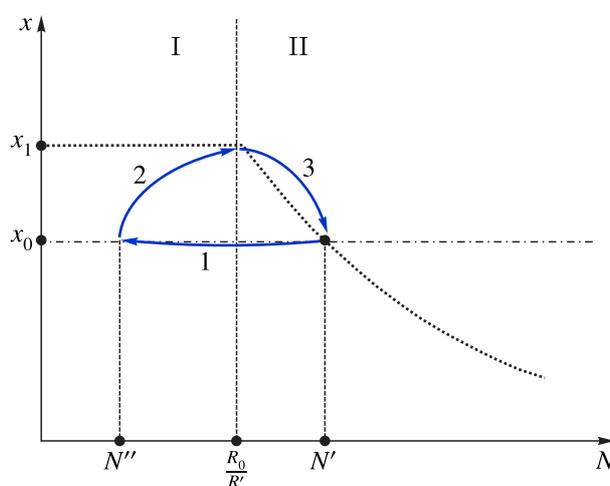


Рис. 6. Фазовый портрет демографических циклов в аграрном обществе (стрелками обозначены фазовые траектории, пунктирная линия — изоклина горизонтальных касательных, штрихпунктирная линия — изоклина вертикальных касательных)

Фазовый портрет демографических циклов, когда причиной быстрого уменьшения численности населения являются гражданские войны, изображен на рис. 6 (стрелка 1 — быстрое снижение численности населения в результате войны, N' — численность населения до начала войны, N'' — численность населения после окончания войны, стрелка 2 — повышение благосостояния населения в послевоенное время в результате увеличения земельных наделов, стрелка 3 — медленный демографический рост, сопровождающийся уменьшением земельных наделов на душу населения).

Иллюстрацией к вышесказанному является рис. 7, где приведены исторические данные по демографической динамике Китая в доиндустриальный период, представляющие собой демографические циклы.

2. Моделирование индустриального общества

2.1. Наиболее важными типологическими чертами, характерными для индустриальных обществ (ориентировочно с середины XVIII века до начала семидесятых годов XX века), являются следующие:

¹ Альтернативным способом удержания значения x на уровне выше x_0 в аграрном обществе было непрерывное расширение площади обитания общества R_0 (миграции, захватнические войны) либо искусственное ограничение роста численности населения (например, путем инфантицида, практики поздних браков и т. д.).

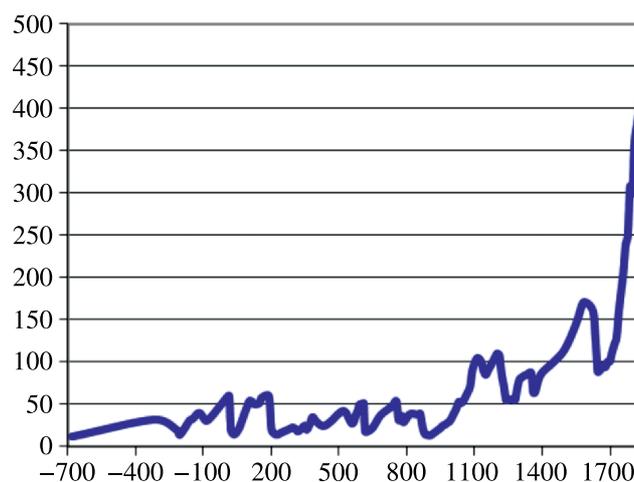


Рис. 7. Демографическая динамика в Китае (млн чел.) в период с VII века до н. э. по середину XIX века н. э. (источник: [Коротаев, Малков, Халтурина, 2019])

- основным видом производственной деятельности индустриального общества является промышленное производство (продукция сельского хозяйства составляет небольшую долю от ВВП);
- движущими силами экономического развития являются технологический прогресс, постепенная замена ручного труда машинным;
- за счет технологического прогресса периодически возникающие ресурсные ограничения, как правило, снимаются за счет введения в оборот новых ресурсов или более эффективного их использования;
- преобладает специализированное промышленное (полупромышленное) производство, ориентированное на рынок; основной производственной единицей является предприятие с использованием различных видов энергии, машин и механизмов¹, а также наемного труда для обслуживания машин и механизмов; основной целью производства являются продажа произведенной продукции на рынке и получение прибыли;
- демографическая динамика характеризуется зависимостью, изображенной на рис. 4, а (с постепенным переходом в развитых странах на зависимость, изображенную на рис. 4, б).

С учетом вышесказанного базовые уравнения (1), (3), (10) модели «Дм–Тх–Эн» для типового индустриального общества приобретает следующий вид.

2.1.1. Обобщенное уравнение демографической динамики.

Базовое уравнение (1), отражающее характер демографической динамики, характерный для классического индустриального общества и изображенный на рис. 4, а, может быть записано в виде (11). Оно означает, что при превышении уровнем благосостояния x критического значения x_0 общество выходит из «мальтузианской ловушки» и начинается рост населения вследствие снижения смертности (особенно младенческой).

2.1.2. Обобщенное уравнение экономической динамики.

¹ При этом функционирование машин и механизмов основано на использовании различных видов энергии: тепловой, электрической, механической и др.

Для индустриального общества основным производимым продуктом является промышленная продукция, доля сельскохозяйственной продукции, предназначенной для потребления (прежде всего продуктов питания), последовательно падает. Растет урбанизация (то есть численность людей, живущих в городах в условиях высокой плотности населения). Соответственно, растут затраты на преобразование внешней среды с целью создания комфортных/приемлемых условий для жизнедеятельности (I_2). При этом увеличение производства поглощается увеличением потребления (стремление к потреблению выше возможностей производства, что обеспечивает непрерывный рост спроса¹). Уравнение (3) принимает вид

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{F(R^-, I_1) - I_1 - I_2}{N} - Q \approx \frac{F(R^-, I_1) - I_1 - I_2}{N} - q \cdot x, \quad (18)$$

где $q \cdot x$ — потребление (предполагается, что потребление пропорционально накоплениям: чем больше материальных благ x , тем больше их потребление; q — коэффициент пропорциональности).

Как упоминалось выше, необходимо разделять ситуации, когда: 1) ограничения по ресурсам отсутствуют (ресурсы доступны в избытке); 2) когда ресурсы в дефиците.

Особенностью индустриального развития в период до середины XX века было то, что оно происходило, по существу, в рамках первой ситуации, поскольку благодаря технологическому прогрессу периодически возникавшие ресурсные ограничения снимались путем введения в оборот новых ресурсов, а также за счет более эффективного их использования².

Соответственно, производственная функция в этом случае записывается в виде (4), а основным фактором производства является количество производителей (рабочей силы) и сопряженных с ними средств труда. С учетом того, что $\frac{F(R^-, I_1)}{N}$ — это ВВП на душу населения, и того, что в рамках базовой модели ВВП на душу населения — это мера измерения технологического прогресса, уравнение (18) может быть записано в виде

$$\frac{dx}{dt} \approx S - \alpha_1 \cdot x - \alpha_2 \cdot x - q \cdot x, \quad (19)$$

где принято, что величины I_1 и I_2 в отсутствие жестких ресурсных ограничений растут пропорционально росту x : $\frac{I_1}{N} \approx \alpha_1 \cdot x$, $\frac{I_2}{N} \approx \alpha_2 \cdot x$ (коэффициенты α_1 и α_2 могут с течением времени изменяться).

2.1.3. Обобщенное уравнение технологической динамики.

На индустриальной стадии развития технологический прогресс становится важнейшим фактором экономической динамики (от него в определяющей степени зависят производительность труда и, соответственно, величина S в уравнении (19)). Для описания технологической динамики используется базовое уравнение (10), в котором величины c и S_0 определяются на основе статистических данных.

2.2. Таким образом, основными уравнениями, определяющими экономико-демографическую динамику индустриального общества в период до семидесятых годов XX века, являются уравнения (11), (19), (10):

$$\frac{dN}{dt} \approx r \cdot N \cdot \left(1 - \frac{x_0}{x}\right), \quad (20)$$

$$\frac{dx}{dt} \approx S - \alpha_1 \cdot x - \alpha_2 \cdot x - q \cdot x, \quad (21)$$

$$\frac{dS}{dt} \approx c \cdot N \cdot S \cdot \left(1 - \frac{S_0}{S}\right). \quad (22)$$

¹ Это необходимое условие для эффективности капитализма как системы.

² Также развитые индустриальные страны снимали свои ресурсные ограничения путем эксплуатации колоний и за счет неравноправного экономического взаимодействия с менее развитыми странами.

При этом характерное время экономического уравнения (21) — это производственный цикл (год и менее), демографического уравнения (20) — поколенческий цикл (25–30 лет). Характерное время технологического уравнения (22) в период становления индустриального общества превышает время поколенческого цикла (технологический рост был еще медленным и только набирал обороты, прежде всего в Англии, где были созданы для этого условия), а к середине XX века становится меньше поколенческого цикла (скорость технологических изменений превышает скорость демографического роста).

Таким образом, в системе уравнений (20)–(22) переменная x является «быстрой» переменной по отношению к переменным N и S , поэтому, по теореме А. Н. Тихонова, дифференциальное уравнение (21) может быть приближенно заменено на алгебраическое уравнение

$$S - \alpha_1 \cdot x - \alpha_2 \cdot x - q \cdot x \approx 0, \quad (23)$$

откуда следует, что величина x пропорциональна величине S :

$$x(t) \approx k_1 \cdot S(t) = \frac{S(t)}{q + \alpha_1 + \alpha_2}. \quad (24)$$

Таким образом, значения x_0 и S_0 тоже пропорциональны друг другу и выполняется соотношение $x_0(t) \approx k_2 \cdot S_0(t)$. Соответственно, уравнение (22) может быть записано в виде

$$\frac{dS}{dt} \approx c \cdot N \cdot S \cdot \left(1 - \frac{S_0}{S}\right) \approx c \cdot S \cdot N \cdot \left(1 - \frac{k \cdot x_0}{x}\right), \quad \text{где } k = \frac{k_2}{k_1}. \quad (25)$$

Оценку динамики значений $x_0(t)$ и $S_0(t)$, входящих в уравнение (25), проведем на основе анализа эмпирических данных. На рис. 8 представлен график, показывающий связь между среднемировым значением ВВП/чел. и численностью населения Земли в период с начала нашей эры по 2020 год.

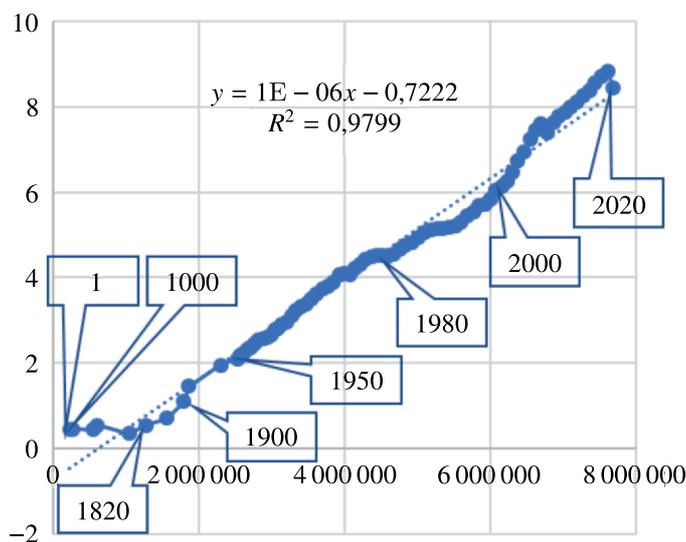


Рис. 8. Связь между среднемировым значением ВВП/чел. (ось ординат, тыс. долл. 1990 года) и численностью населения Земли (ось абсцисс, тыс. чел.) в период с 1 года нашей эры по 2020 год (источник данных: [Maddison, 2018])

На рис. 8 видно, что с начала нашей эры до начала XIX века (то есть на аграрной стадии) среднемировое значение ВВП/чел. практически не изменялось и было равно примерно 500 долл.

1990 года, что отражает наличие «мальтузианской ловушки» [Clark, 2007] и примерное постоянство в этот период значений x_0 и $S_0(t)$. Однако затем (на индустриальной стадии) среднемировое значение ВВП/чел. стало расти практически пропорционально росту численности населения Земли. Поскольку подавляющая часть населения Земли проживала в развивающихся странах, в которых ВВП/чел. не слишком отличался от «прожиточного минимума», то можно сделать вывод, что рост среднемирового ВВП/чел. отражает рост значений x_0 и S_0 .

Имея в виду пропорциональную связь между среднемировым значением ВВП/чел. и численностью населения Земли (рис. 8), а также то, что среднемировое значение ВВП/чел. на индустриальной стадии развития мало отличалось от среднемирового «прожиточного минимума», выражение, отражающее рост значения $x_0(t)$ с начала XIX века, может быть записано в виде

$$x_0(t) \approx x_0 \cdot \left(1 + b \cdot \frac{N(t) - N(1800)}{N(1800)} \right), \quad t \geq 1800, \tag{26}$$

где x_0 соответствует «прожиточному минимуму», характерному для аграрного общества. Параметры $r, \alpha_1, \alpha_2, q, c, k, x_0, b$, входящие в уравнения (20), (21), (25), (26), определяются на основе сопоставления результатов численного моделирования со статистическими данными по динамике численности населения мира и среднемирового ВВП/чел. за период 1800–1960 гг.

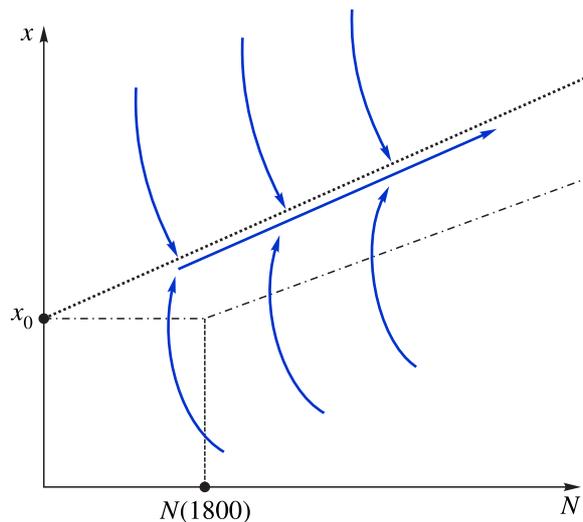


Рис. 9. Фазовый портрет индустриального общества (стрелками обозначены фазовые траектории, пунктирная линия — изоклина горизонтальных касательных, штрихпунктирная линия — изоклина вертикальных касательных)

Фазовый портрет системы (20), (21), (25), (26) в координатах x и N имеет вид, изображенный на рис. 9. Видно, что в отличие от аграрного общества (см. рис. 5) фазовый портрет индустриального общества (см. рис. 9) не имеет точки устойчивого равновесия. Это является следствием того, что в отличие от аграрного общества, где существовала обратная *отрицательная* связь между x и N (чем больше N , тем меньше душевой доход в силу ограниченности земельного ресурса, см. уравнение (16)), в индустриальном обществе возникает обратная *положительная* связь между x и N (чем больше N , тем больше изобретателей и изобретений, повышающих производительность труда и в конечном итоге душевой доход). Соответственно, «общество ограничений», каковым было аграрное общество, превращается в «общество роста». При этом обратная положительная связь, охватывающая уравнения (20)–(22), с течением времени усиливается, что приводит не просто к экспоненциальному, а к взрывному, *гиперболическому*

росту, что подтверждается статистическими данными по мировой демографии и экономике до 60-х годов XX века (см. рис. 1 и 2).

Особенностью гиперболического роста является то, что он заканчивается *сингулярностью*, когда в определенный момент времени рассматриваемый показатель уходит в бесконечность. Однако понятно, что реальный рост не может быть бесконечным, поэтому неизбежно должны возникнуть причины и механизмы, переводящие систему из режима неограниченного роста в более спокойный режим развития. Понятно также, что общество при этом должно существенным образом измениться. По существу, речь идет о *глобальном фазовом переходе* мировой системы из одного состояния в другое, и мы живем именно в этот переходный период.

3. Анализ и моделирование дальнейшего исторического развития

3.1. Как уже упоминалось в начале статьи, характерной особенностью современной эпохи является то, что начиная с 1970-х годов стало наблюдаться торможение ключевых показателей мирового развития (рис. 3), которые до этого на протяжении двухсот лет демонстрировали гиперболический рост (рис. 1 и 2)¹. При этом речь идет не только о демографических и экономических показателях. Так, на рис. 10 представлены данные по динамике изобретательской активности за последние четыре столетия. Видно, что изобретательская активность, последовательно усиливаясь с середины XVIII века, достигла максимума в 1960–1970 гг., а затем стала замедляться.

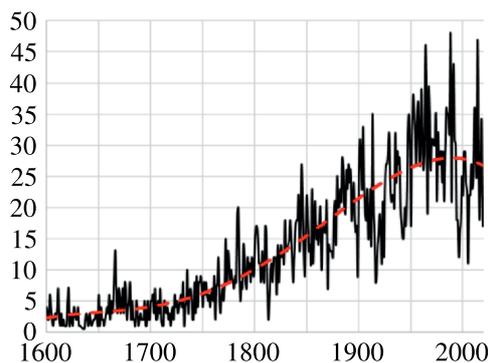


Рис. 10. Динамика количества изобретений в год в период 1600–2020 гг. (тренд обозначен пунктирной линией; источник данных: [Bunch, Hellemans, 2004])

3.2. С учетом вышесказанного базовые уравнения для наступившей стадии исторического развития приобретают следующий вид.

3.2.1. Обобщенное уравнение демографической динамики.

В отличие от представлений пятидесятилетней давности [Meadows et al., 1972], если не предпринимать специальных ограничительных мер, численность населения будет расти по экспоненте (то есть в соответствии с динамикой, изображенной на рис. 4, а), исторический опыт конца XX – начала XXI века показал, что в урбанизированном обществе² модель семьи трансформируется из многодетной в малодетную и, соответственно, проблемой развитых стран становится не рост населения, а его депопуляция. Разные варианты торможения роста населения

¹ Торможение демографического роста связано с тем, что во многих странах мира произошел демографический переход, характеризующийся снижением рождаемости [Демографический переход, 2022]. Торможение экономического роста связано, в частности, с усиливающимися ресурсными ограничениями, с нарастанием экологических проблем.

² Доля городского населения в населении мира составляла в 1800 году 3%, в 1850 году — 6,4%, в 1900 году — 13,6%, в 1950 году — 28,9%, в 2000 году — 47,4%, в 2019 году — 55,7% [Городское население, 2022].

изображены на рис. 4, б; 4, в; 4, г. Базовые уравнения, соответствующие этим вариантам демографической динамики, могут быть записаны в виде

$$\frac{dN}{dt} \approx r \cdot N \cdot \left(1 - \frac{x_0}{x}\right) \cdot \frac{x_0}{x} \quad (\text{демографическая динамика на рис. 4, б}), \quad (27)$$

$$\frac{dN}{dt} \approx r \cdot N \cdot \left(1 - \frac{x_1}{x} - \frac{x}{x_2}\right) \quad (\text{демографическая динамика на рис. 4, в}), \quad (28)$$

$$\frac{dN}{dt} \approx r \cdot N \cdot \left(1 - \frac{x_1}{x} - \frac{x}{x_2}\right) \cdot \left(\frac{x_0}{x}\right)^2 \quad (\text{демографическая динамика на рис. 4, г}), \quad (29)$$

где x_0, x_1, x_2 — параметры модели. Результатом этой динамики является постепенная стабилизация численности населения (уравнения (27) и (29)) или его уменьшение (уравнение (28)) из-за снижения рождаемости.

3.2.2. Обобщенное уравнение экономической динамики.

Поскольку основой экономики являются промышленное производство и развитие технологий, то общий вид уравнения экономической динамики остается прежним (см. уравнение (18)), изменения касаются лишь вида входящих в него членов. В частности, в отличие от индустриальной стадии развития становятся все более острыми экологические проблемы, а также проблемы изменения характеристик внешней среды (например, климата), приводящие к ухудшению условий жизни. Соответственно, сохранив вид уравнения (18), необходимо ввести в него зависимость I_1 и I_2 от состояния внешней среды, качества ресурсов и т. п.

3.2.3. Обобщенное уравнение технологической динамики.

На наступившей стадии исторического развития технологический прогресс остается ключевым фактором экономической динамики. Для описания технологической динамики целесообразно использовать уравнение (25), в котором величины c и k задаются на основе имеющихся статистических данных. При этом необходимо учесть замедление изобретательской активности и темпа роста ВВП/чел., о которых свидетельствуют статистические данные (см. рис. 10 и 3).

3.3. Таким образом, базовая модель демографо-экономической динамики на постиндустриальной стадии развития может быть записана в виде следующей системы уравнений:

$$\frac{dN}{dt} \approx r \cdot N \cdot \left(1 - \frac{x_0}{x}\right) \cdot \frac{x_0}{x}, \quad (30)$$

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{F(R^-, I_1) - I_1 - I_2}{N} - Q = S - \frac{I_1}{N} - \frac{I_2}{N} - Q, \quad (31)$$

$$\frac{dS}{dt} \approx c \cdot N \cdot S \cdot \frac{1 - \frac{S_0}{S}}{1 + \frac{S}{S'}} \approx c \cdot S \cdot N \cdot \frac{1 - \frac{k \cdot x_0}{x}}{1 + \frac{S}{S'}}, \quad (32)$$

где S' — постоянный параметр, ответственный за торможение роста S , величина $x_0(t)$ изменяется в соответствии с выражением (26).

По сравнению с системой уравнений (20), (21), (25), (26), описывающей динамику индустриального общества, в системе уравнений (30)–(32) произошли следующие изменения.

В демографическом уравнении (30) появился член, учитывающий снижение рождаемости при увеличении уровня благосостояния x (что характерно для второй фазы глобального демографического перехода¹).

¹ Вторая фаза демографического перехода (приводящая к замедлению роста численности населения) имела место в экономически развитых странах мира уже на заключительной фазе индустриального общества, однако в мировом масштабе она проявилась после шестидесятых годов XX века, когда ускорились темпы экономического роста и социального развития в странах мир-системной Полупериферии и Периферии. Уравнение (30) отражает динамику второй фазы глобального демографического перехода, соответствующую рис. 4, б, однако также возможны варианты развития, соответствующие рис. 4, в и 4, г. По какому из этих вариантов будут происходить реальные демографические изменения, пока не ясно.

В уравнении технологической динамики (32) появился член, учитывающий наблюдаемое после шестидесятих годов XX века замедление изобретательской активности и темпа роста ВВП/чел. (при этом выражение (26) для величины $x_0(t)$ оставлено неизменным, поскольку приблизительная пропорциональность между значениями ВВП/чел. и N продолжает сохраняться вплоть до настоящего времени, см. рис. 8).

В экономическом уравнении (31) существенным становится количественный учет влияния на величины I_1 и I_2 наличия ресурсных ограничений и необходимости решения экологических проблем. Базовым сценарием развития постиндустриального общества, широко использующего технологические достижения, целесообразно принять сценарий, в котором человечеству в конечном итоге удастся выйти на режим сбалансированного развития, в котором ресурсные и экологические проблемы удастся решить, развивая соответствующие технологии и выделяя для решения этих проблем необходимое финансирование. Можно показать, что это возможно в случае, если величины I_1 и I_2 будут расти по мере роста F , то есть $I_1 \approx g_1 \cdot F$, $I_2 \approx g_2 \cdot F$. С учетом того, что $F = S \cdot N$, экономическое уравнение (31) преобразуется к виду

$$\frac{dx}{dt} \approx S - \frac{I_1}{N} - \frac{I_2}{N} - Q \approx S - g_1 \cdot S - g_2 \cdot S - q \cdot x = S \cdot (1 - g_1 - g_2) - q \cdot x, \quad (33)$$

где g_1 и g_2 — коэффициенты, значение которых может изменяться со временем, увеличиваясь с ростом величины N вследствие сопутствующего нарастания ресурсных и экологических проблем (то есть $g_1 = g_1(N)$, $g_2 = g_2(N)$).

На рис. 11 представлены результаты расчетов по модели (30), (32), (33) для нескольких сценариев мирового развития. Параметры модели настраивались на основе сопоставления результатов численного моделирования со статистическими данными по динамике численности населения мира и среднемирового ВВП/чел. за период 1950–2020 гг. (на рис. 11 они обозначены точками), при этом считалось, что $g_1(N)$ и $g_2(N)$ являются линейными функциями от N .

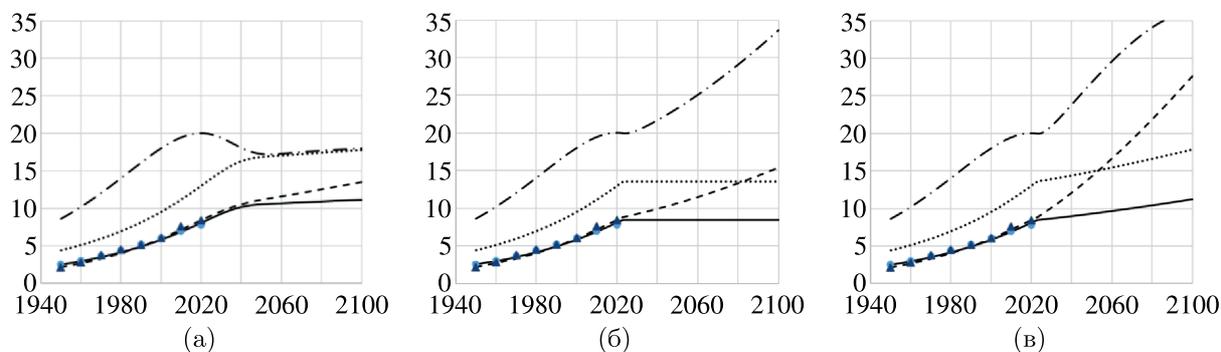


Рис. 11. Прогнозные расчеты мировой демографо-экономической динамики в соответствии с моделью (30), (32), (33) (сплошная линия — численность населения N , млрд чел.; штриховая линия — среднемировое значение ВВП/чел. S , тыс. долл. 1990 года; штрихпунктирная линия — $x(t)$, отн. ед.; пунктирная линия — $x_0(t)$, отн. ед.; круглые и треугольные маркеры — статистические значения N и среднемирового ВВП/чел. соответственно): а) инерционный сценарий; б) нулевой демографический рост; в) активизация инновационной деятельности

На рис. 11, а представлены результаты прогнозного расчета для инерционного сценария. Они показывают, что если ситуация будет развиваться инерционным образом (так, как развивалась в предыдущие полвека), то в предстоящие 30 лет следует ожидать серьезного торможения демографического и экономического роста, стабилизации (и даже некоторого снижения) уровня потребления x , притом что затраты на жизнеобеспечение будут постоянно увеличиваться (ожидаемый прирост ВВП/чел. будет тратиться в основном на эти цели).

При изменении значений параметров рассматриваемой системы динамика переменных может существенным образом измениться. На рис. 11, б представлены результаты прогнозного расчета для гипотетического сценария, при котором параметры системы соответствуют инерционному сценарию, но начиная с 2023 года демографический рост принудительно останавливается ($\frac{dN}{dt} = 0$) и население Земли фиксируется на уровне 2022 года. Расчеты показывают, что в этом случае уровень потребления x продолжает расти. Это внешне привлекательный сценарий, но не ясно, каким образом может быть одномоментно остановлен демографический рост населения Земли, притом что в настоящее время его темпы по-прежнему достаточно высоки (особенно в африканских странах южнее Сахары).

На рис. 11, в представлены результаты прогнозного расчета для сценария, при котором темпы демографического роста постепенно снижаются (что соответствует заключительной фазе глобального демографического перехода), но при этом интенсифицируется инновационная активность (через форсирование НИР и НИОКР). В этом случае численность населения продолжает умеренно расти при одновременном росте уровня благосостояния населения.

Подобных сценариев может быть много. Простой перебор возможных вариантов трудоемок и сложен для анализа. В этой ситуации более содержательным является анализ фазовых портретов.

Фазовый портрет системы (30), (32), (33) в координатах x и N имеет вид, изображенный на рис. 12.

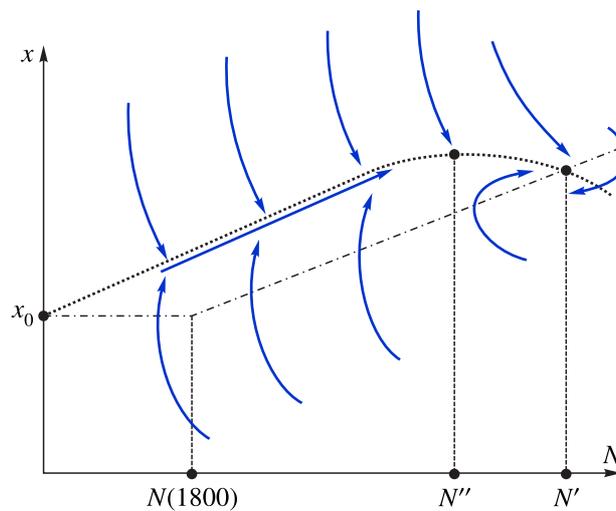


Рис. 12. Фазовый портрет системы (30), (32), (33) (стрелками обозначены фазовые траектории, пунктирная линия — изоклина горизонтальных касательных, штрихпунктирная линия — изоклина вертикальных касательных; расположение пунктирной изоклины зависит от динамики величины S)

Левая часть рисунка (где значения N еще не достигают очень больших величин) аналогична изображению на рис. 9, отображающему фазовый портрет индустриального общества. В правой части рисунка (при больших значениях N) начинает существенным образом сказываться как ограничение на рост S , так и зависимость g_1 и g_2 от N . Вследствие этого происходит сначала сближение, а затем и пересечение изоклин, напоминающее ситуацию на фазовом портрете аграрного общества (см. рис. 5). При этом, как и в аграрном обществе, возникает аттрактор типа «устойчивый фокус» при $N = N'$.

Особенности фазового портрета постиндустриального общества (рис. 12) заключаются в следующем.

- Демографический рост, в отличие от ситуации в индустриальном обществе (см. рис. 9), перестает ускоряться, происходит его быстрое торможение. Численность населения стабилизируется (на рис. 12 это точка N''), при этом не обязательно достигая значения N' , соответствующего устойчивому аттрактору. Важно, что это торможение происходит естественным путем (в процессе происходящей в настоящее время в большинстве стран мира второй фазы демографического перехода). В отличие от аграрного общества (см. рис. 5), где предельная численность населения детерминировалась демографической емкостью территории (в конечном итоге — количеством земельных ресурсов), в постиндустриальном обществе величина N'' может варьироваться в широких пределах (даже может существенным образом снижаться, если демографическая динамика будет идти в соответствии с уравнением (28)) и во многом зависит от проводимой демографической политики.
- Динамика уровня благосостояния x зависит как от численности населения N , так и от уровня развития технологий S . При этом существенную роль играет то, сколько усилий приходится тратить на восстановление ресурсов, утилизацию отходов и т. п. (то есть каковы значения g_1 и g_2 в уравнении (33)), а также то, каковы интенсивность и направленность технологического прогресса.

Таким образом, моделирование показывает, что период гиперболического экономико-демографического роста, характерный для индустриального общества, завершается. Мир вступает в *новую фазу исторического развития*, происходит переход человечества в новое фазовое состояние. Характер дальнейших изменений во многом зависит от того, как будут развиваться социально-экономические и социально-политические процессы, влияющие на значения параметров r , q , c , k , g_1 , g_2 .

Заключение

1. Статистические данные свидетельствуют о резких изменениях, происходящих в мире. После двухсотлетнего периода быстрого роста экономических и демографических характеристик в последние десятилетия наблюдается не менее стремительное их торможение. Прогнозы, основанные на проецировании сложившихся тенденций на будущие периоды, теряют всякий смысл.

2. В этих условиях резко возрастают актуальность и важность моделирования и прогнозирования мировой динамики на основе анализа и математической формализации фундаментальных закономерностей развития человеческого общества. Исследования в этом направлении проводились в МГУ имени М. В. Ломоносова под руководством академиков В. А. Садовниченко и А. А. Акаева на протяжении более 10 лет. В результате этих исследований предложена методология моделирования глобальных процессов. Проанализированы закономерности долгосрочного исторического развития.

3. В данной статье изложены некоторые результаты макроисторического моделирования демографо-экономической динамики, рассмотрены особенности демографо-экономических процессов на разных стадиях исторического процесса. Как показывают математическое моделирование, человечество в настоящее время переходит на принципиально *новую фазу исторического развития*, происходит переход человеческого общества в новое фазовое состояние, облик которого еще не определен. Моделирование показывает, что возможны различные варианты дальнейшего развития в зависимости от того, как будут развиваться социально-экономические и социально-политические процессы.

Список литературы (References)

- Городское население. — [Электронный ресурс]. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Городское_население (дата обращения: 02.09.2022 г.).
Gorodskoe naselenie [Urban population]. — [Electronic resource] (in Russian). — Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Городское_население (accessed: 02.09.2022).
- Демографический переход. — [Электронный ресурс]. — URL: <https://bigenc.ru/economics/text/1946892> (дата обращения: 02.09.2022 г.).
Demograficheskij perekhod [Demographic transition]. — [Electronic resource] (in Russian). — Available at: <https://bigenc.ru/economics/text/1946892> (accessed: 02.09.2022).
- Доклады Римскому клубу. — [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.clubofrome.org/publications/> (дата обращения: 02.09.2022 г.).
Doklady Rimskomu klubu [Reports to the Club of Rome]. — [Electronic resource] (in Russian). — Available at: <https://www.clubofrome.org/publications/> (accessed: 02.09.2022).
- Коротаев А. В., Малков А. С., Халтурина Д. А. Законы истории. Математическое моделирование развития мир-системы. Демография, экономика, культура. — 3-е изд. — М.: ЛЕНАНД/URSS, 2019.
Malkov A. S., Korotayev A. V., Halturina D. A. Zakony istorii. Matematicheskoe modelirovanie razvitiya mir-sistemy. Demografiya, ekonomika, kul'tura [The laws of history: Mathematical modeling of the development of the world-system. Demography, economy, culture]. — 3rd ed. — Moscow: LENAND/URSS, 2019 (in Russian).
- Коротаев А. В., Халтурина Д. А., Божевольнов Ю. В. Законы истории. Вековые циклы и тысячелетние тренды. Демография, экономика, войны. — 4-е изд. — М.: ЛЕНАНД/URSS, 2015.
Korotayev A. V., Khaltourina D. A., Bogevolnove Yu. V. Zakony istorii. Vekovye tsikly i tysyacheletnie trendy. Demografiya, ekonomika, voyny [Laws of history: secular cycles and millennial trends. Demography, economy, wars]. — 4th ed. — Moscow: LENAND/URSS, 2015 (in Russian).
- Малков С. Ю. Социальная самоорганизация и исторический процесс. Возможности математического моделирования. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009.
Malkov S. Yu. Social'naya samoorganizaciya i istoricheskij process. Vozmozhnosti matematicheskogo modelirovaniya [Social self-organization and historical process. Possibilities of mathematical modeling]. — Moscow: Book house "LIBROCOM", 2009 (in Russian).
- Малков С. Ю., Андреев А. И., Гринин Л. Е., Коротаев А. В., Малков А. С. Россия в контексте мировой динамики: моделирование и прогноз. — М.: Московская редакция издательства «Учитель», 2016.
Malkov S. Yu., Andreev A. I., Grinin L. E., Korotayev A. V., Malkov A. S. Rossiya v kontekste mirovoj dinamiki: modelirovanie i prognoz [Russia in the context of world dynamics: modeling and forecast]. — Moscow: Moscow Branch of the Uchitel Publishing House, 2016 (in Russian).
- Садовничий В. А., Акаев А. А., Коротаев А. В., Малков С. Ю. Моделирование и прогнозирование мировой динамики. — М.: ИСПИ РАН, 2012.
Sadovnichiy V. A., Akaev A. A., Korotayev A. V., Malkov S. Yu. Modelirovaniye i prognozirovaniye mirovoy dinamiki [Modeling and forecasting of world dynamics]. — Moscow: ISPI RAN, 2012 (in Russian).
- Садовничий В. А., Акаев А. А., Коротаев А. В., Малков С. Ю., Соколов В. Н. Анализ и моделирование мировой и страновой динамики. — М.: ЛЕНАНД, 2017.
Sadovnichiy V. A., Akaev A. A., Korotayev A. V., Malkov S. Yu., Sokolov V. N. Analiz i modelirovaniye mirovoy i stranovoy dinamiki [Analysis and modeling of world and country dynamics]. — Moscow: LENAND, 2017 (in Russian).
- Тихонов А. Н. Системы дифференциальных уравнений, содержащие малые параметры при производных // Математический сборник. — 1952. — Т. 31, № 3. — С. 576–586.
Tikhonov A. N. Sistemy differentsial'nykh uravneniy, soderzhashchiye malyye parametry pri proizvodnykh [Systems of differential equations containing small parameters at derivatives] // *Matematicheskij sbornik*. — 1952. — Vol. 31, No. 3. — P. 576–586 (in Russian).
- Bunch B., Hellemans A. The history of science and technology. — Boston, New York: Houghton Mifflin Company, 2004.
- Clark G. A farewell to alms: a brief economic history of the world. — Princeton University Press, 2007.
- von Foerster H., Mora P., Amiot L. Doomsday: Friday, 13 November, A. D. 2026. At this date human population will approach infinity if it grows as it has grown in the last two millennia // *Science*. — 1960. — Vol. 132, No. 3436. — P. 1291–1295.

- Hegre H., Nygård H.M., Landsverk P.* Can we predict armed conflict? How the first 9 years of published forecasts stand up to reality // *International Studies Quarterly*. — 2021. — No. 65 (3). — P. 660–668.
- Kremer M.* Population growth and technological change: One million B.C. to 1990 // *The Quarterly Journal of Economics*. — 1993. — Vol. 108, No. 3. — P. 681–716.
- Maddison Project database 2018. — Available at: <https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/releases/maddison-project-database-2018?lang=en> (accessed: 02.09.2022).
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W. III.* The limits to growth. A report for the Club of Rome's on the predicament of Mankind. — New York: Universe Books, 1972.
- Randers J.* 2052: A global forecast for the next forty years. — Vermont: Chelsea Green Publishing, 2012.
- Randers J., Rockström J. et al.* Transformation is feasible. How to achieve the sustainable development goals within planetary boundaries. — Stockholm Resilience Centre, Stockholm University, SE – 106 91 Stockholm, Sweden, 2018.
- UN Population Division. World urbanization prospects 2018. — New York: UN Population Division, 2018.
- UN Population Division. World population prospects 2022. — New York: United Nations, 2022.
- Vollset S.E., Goren E., Yuan C.-W., Cao J., Smith A.E., Hsiao T. et al.* Fertility, mortality, migration, and population scenarios for 195 countries and territories from 2017 to 2100: a forecasting analysis for the global burden of disease study // *The Lancet*. — 2020. — No. 396 (10 258). — P. 17–23.
- Wilson A.G.* (ed.) Global dynamics: approaches from complexity science. — Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016.