

УДК: 51-77

Модернизация как глобальный процесс: опыт математического моделирования

С. Ю. Малков^{1,а}, О. И. Давыдова²

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

² ООО «АйДесайд Консалтинг»,
Россия, 141070, г. Королев, ул. Калинина, д. 66, оф. 32

E-mail: ^as@malkov.org, ^bdavydova.olga.msk@gmail.com

Получено 15.02.2021, после доработки — 23.06.2021.
Принято к публикации 30.06.2021.

В статье проведен анализ эмпирических данных по долгосрочной демографической и экономической динамике стран мира за период с начала XIX века по настоящее время. В качестве показателей, характеризующих долгосрочную демографическую и экономическую динамику стран мира, были выбраны данные по численности населения и ВВП ряда стран мира за период 1500–2016 годов. Страны выбирались таким образом, чтобы в их число вошли представители с различным уровнем развития (развитые и развивающиеся страны), а также страны из различных регионов мира (Северная Америка, Южная Америка, Европа, Азия, Африка). Для моделирования и обработки данных использована специально разработанная математическая модель. Представленная модель является автономной системой дифференциальных уравнений, которая описывает процессы социально-экономической модернизации, в том числе процесс перехода от аграрного общества к индустриальному и постиндустриальному. В модель заложена идея о том, что процесс модернизации начинается с возникновения в традиционном обществе инновационного сектора, развивающегося на основе новых технологий. Население из традиционного сектора постепенно перемещается в инновационный сектор. Модернизация завершается, когда большая часть населения переходит в инновационный сектор.

При работе с моделью использовались статистические методы обработки данных, методы Big Data, включая иерархическую кластеризацию. С помощью разработанного алгоритма на базе метода случайного спуска были идентифицированы параметры модели и проведена ее верификация на основе эмпирических рядов, а также проведено тестирование модели с использованием статистических данных, отражающих изменения, наблюдаемые в развитых и развивающихся странах в период происходящей в течение последних столетий модернизации. Тестирование модели продемонстрировало ее высокое качество — отклонения расчетных кривых от статистических данных, как правило, небольшие и происходят в периоды войн и экономических кризисов. Проведенный анализ статистических данных по долгосрочной демографической и экономической динамике стран мира позволил определить общие закономерности и formalизовать их в виде математической модели. Модель будет использоваться с целью прогноза демографической и экономической динамики в различных странах мира.

Ключевые слова: модернизация, страны мира, долгосрочная демографическая и экономическая динамика, математическое моделирование

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

© 2021 Сергей Юрьевич Малков, Ольга Игоревна Давыдова

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Unported License.
Чтобы получить текст лицензии, посетите веб-сайт <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/>
или отправьте письмо в Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

UDC: 51-77

Modernization as a global process: the experience of mathematical modeling

S. Yu. Malkov^{1,a}, O. I. Davydova²

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

² iDecide Consulting LLC,
office 32, 6b Kalinina st., Korolev, 141070, Russia

E-mail: ^as@malkov.org, ^bdavydova.olga.msk@gmail.com

Received 15.02.2021, after completion — 23.06.2021.

Accepted for publication 30.06.2021.

The article analyzes empirical data on the long-term demographic and economic dynamics of the countries of the world for the period from the beginning of the 19th century to the present. Population and GDP of a number of countries of the world for the period 1500–2016 were selected as indicators characterizing the long-term demographic and economic dynamics of the countries of the world. Countries were chosen in such a way that they included representatives with different levels of development (developed and developing countries), as well as countries from different regions of the world (North America, South America, Europe, Asia, Africa). A specially developed mathematical model was used for modeling and data processing. The presented model is an autonomous system of differential equations that describes the processes of socio-economic modernization, including the process of transition from an agrarian society to an industrial and post-industrial one. The model contains the idea that the process of modernization begins with the emergence of an innovative sector in a traditional society, developing on the basis of new technologies. The population is gradually moving from the traditional sector to the innovation sector. Modernization is completed when most of the population moves to the innovation sector.

Statistical methods of data processing and Big Data methods, including hierarchical clustering were used. Using the developed algorithm based on the random descent method, the parameters of the model were identified and verified on the basis of empirical series, and the model was tested using statistical data reflecting the changes observed in developed and developing countries during the period of modernization taking place over the past centuries. Testing the model has demonstrated its high quality — the deviations of the calculated curves from statistical data are usually small and occur during periods of wars and economic crises. Thus, the analysis of statistical data on the long-term demographic and economic dynamics of the countries of the world made it possible to determine general patterns and formalize them in the form of a mathematical model. The model will be used to forecast demographic and economic dynamics in different countries of the world.

Keywords: modernization, countries of the world, long-term demographic and economic dynamics, mathematical modeling

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2021, vol. 13, no. 4, pp. 859–873 (Russian).

The work was carried out within the framework of the Program for the Development 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. Особенности демографо-экономической динамики процессов модернизации

Новое и Новейшее Время — это время глобальных перемен, эпоха модернизации, перехода от аграрного общества к индустриальному на основе динамичного развития научно-технических знаний. Процесс модернизации проходил в разных странах по-разному, с различной скоростью и интенсивностью, но тем не менее это поистине глобальный процесс. Это хорошо видно на рис. 1 и 2, где представлены графики демографического роста и роста ВВП на душу населения в ряде стран мира в период с 1820 года по 2008 год.

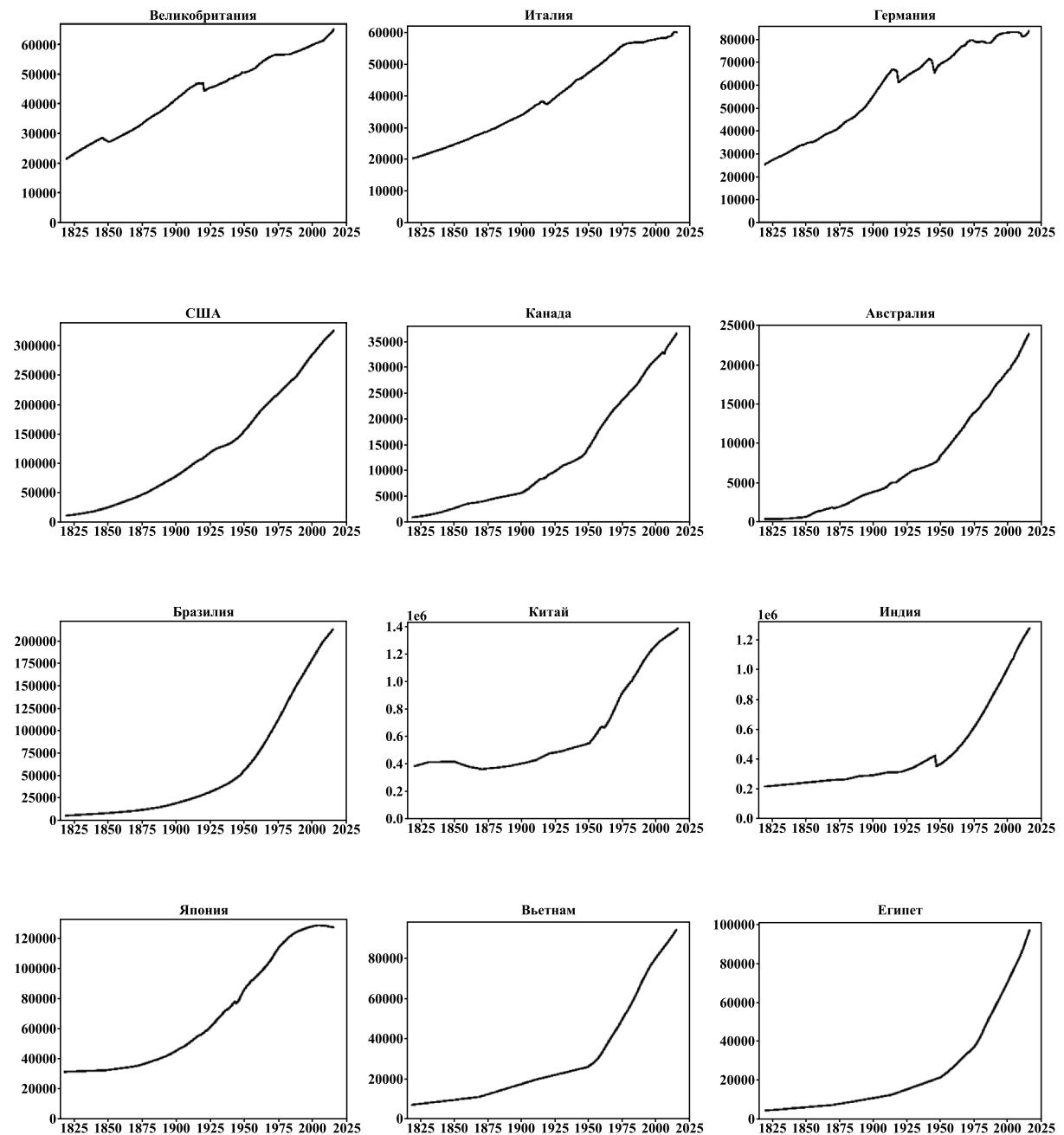


Рис. 1. Динамика численности населения ряда стран мира в период с 1820 по 2008 год, тыс. чел. (источник данных: [Мэддисон, 2010])

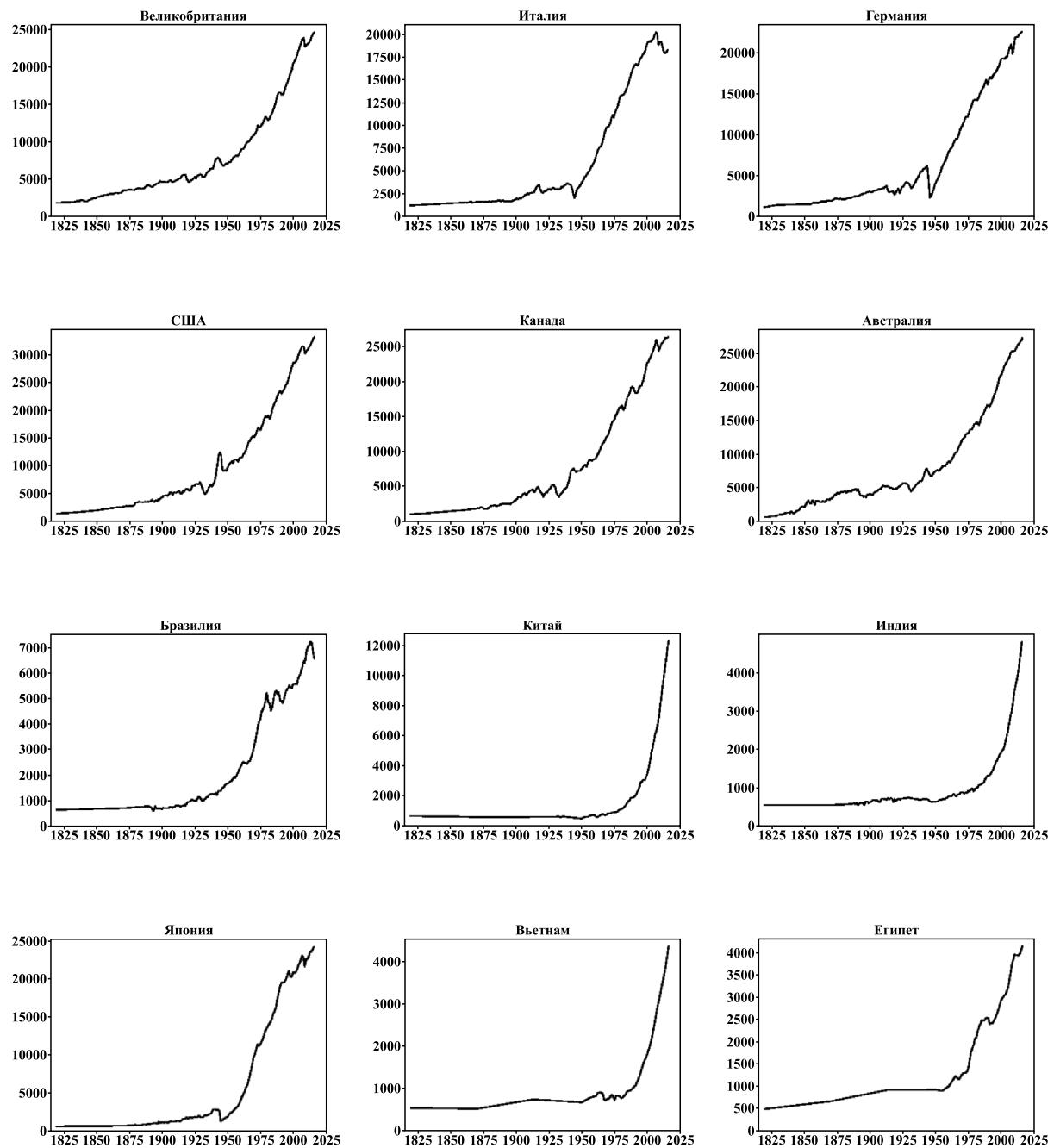


Рис. 2. Динамика ВВП на душу населения в ряде стран мира в период с 1820 по 2008 год (ВВП измеряется в международных долларах США 1990 года; источник данных: [Мэддисон, 2010])

Видно, что графики, отражающие демографическую и экономическую динамику, могут существенно отличаться от страны к стране в своих деталях. Однако для развитых стран обращает на себя внимание эмпирическая закономерность, что на первом этапе модернизации численность населения и ВВП на душу населения, как правило, растут быстро и согласованно, затем ВВП на душу населения начинает обгонять рост населения, далее рост населения начинает тормозиться, а вслед за ним начинает тормозиться и ВВП на душу населения. То есть возникает определенный цикл последовательного ускорения темпов роста демографических и экономических характеристик, а затем их последовательного замедления. В развивающихся странах, как правило, указанная закономерность отслеживается хуже, по-видимому, в силу нестабиль-

ности их демографического и экономического развития, а также вследствие того, что эти страны находятся на начальных этапах модернизации (то есть пока еще только в начале описанного выше цикла).

Возникает вопрос: если статистические данные указывают на наличие закономерности, то можно ли сформулировать математическую модель, которая объясняла бы эту закономерность и которую можно было бы использовать для прогноза дальнейшей демографо-экономической динамики стран мира?

Обсуждение. Модель модернизации

Процессы модернизации связывают с трансформацией аграрного общества в общество индустриального типа. Анализу этой трансформации в разных странах посвящено большое количество исследований (см., например, [Вебер, 1990; Гавров, 2009; Гринин, 2010, 2012, 2017; Мальтус, 1993; Эйзенштадт, 2010; Goldstone, 2002; Grinin, 2012; Lerner, 1958; Levy, 1966, 1967; Mol, 1992; Wallerstein, 2011]). В ряде работ предпринимались попытки количественного описания процессов модернизации (см., например, [Капица, 1999; Коротаев и др., 2007; Медоуз, 1991, 2007; Нефедов, 2002; Foerster, 1960; Kremer, 1990, с. 681–716; Mesarovic, Pestel, 1974; Turchin, 2003; Turchin, Korotayev, 2006, с. 121–158;]). В работах [Малков, 2015; Садовничий и др., 2014] обсуждается логика первоначального убывания темпов роста демографических и экономических характеристик модернизирующихся обществ, а затем их последовательного замедления. Эта логика положена в основу математической модели, суть ее заключается в следующем.

Общество, вставшее на путь модернизации, изначально является традиционным, основанным на сельскохозяйственном производстве с использованием ручного труда. Население преимущественно живет в сельской местности. Из-за ограниченности ресурсной базы такое общество находится в малтизианской ловушке, численность населения ограничивается демографической емкостью территории [Мальтус, 1993; Grinin, 2012, т. 3, в. 1, с. 124–157].

Модернизация начинается с того, что в традиционном обществе появляется инновационный сектор (см. рис. 3), развивающийся на основе новых технологий.

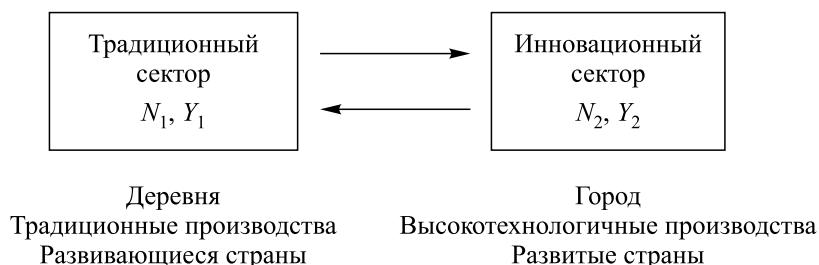


Рис. 3. Схема взаимодействия традиционного и инновационного секторов общества в процессе модернизации (N — численность населения, Y — уровень производства)

Инновационный сектор может возникнуть в результате действия как внутренних¹, так и внешних² причин. Центры развития инновационного сектора располагаются в городах и промышленных поселках, куда начинает стекаться население из деревень, снабжая инновационный сектор дешевой рабочей силой. Причина этой миграции в том, что в традиционном секторе уровень производительности труда, а следовательно, и уровень жизни ниже, чем в инновационном секторе. Из-за роста уровня жизни в инновационном секторе падает детская смертность,

¹ Примером этому является развитие Англии начиная с шестнадцатого века.

² Внешние причины, как правило, обусловлены влиянием более развитых стран.

вследствие чего начинается рост численности населения. Если при этом продолжает расти производительность труда, то мальтизанская ловушка не возникает и демографический рост переходит в демографический взрыв. Это начальная фаза модернизации. Во время нее, как правило, возникают сильные социальные диспропорции (в частности, формируется так называемый молодежный бугор [Коротаев и др., 2012], часто порождающий социальную нестабильность и политические кризисы. Но при этом положительные обратные связи преобладают, что приводит к быстрому росту и населения и инновационного сектора экономики.

Завершающая фаза модернизации начинается, когда население становится преимущественно городским, инновационный сектор преобладает и распространяется уже и на сельскохозяйственное производство. При этом одновременно с ростом материального благосостояния населения изменяется модель семьи: вместо многодетной она становится малодетной. Рожаемость уменьшается, и, когда она снижается до уровня смертности, численность населения стабилизируется³. В этой фазе отрицательные обратные связи начинают преобладать над положительными: соответственно, на смену быстрому демографическому росту приходит его торможение, сопровождающееся стремительным старением населения.

Эту логику процесса модернизации отображает следующая базовая математическая модель:

$$\frac{dN_1}{dt} = (\text{воспроизводство } N_1) - (\text{миграция в города}) \approx a_1(t)N_1 - b(t)N_1N_2, \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = (\text{воспроизводство } N_2) + (\text{миграция в города}) \approx a_2(t)N_2 + b(t)N_1N_2, \quad (2)$$

$$y = (\text{ВВП}) / (\text{численность населения}) = \frac{Y}{N_1 + N_2}. \quad (3)$$

Здесь Y — производимый в обществе валовый внутренний продукт (ВВП); y — производство ВВП на душу населения; N_1 — численность населения, входящего в традиционный сектор экономики; N_2 — численность населения, входящего в инновационный сектор экономики; a_1 , a_2 — переменные коэффициенты, характеризующие воспроизводство населения в традиционном (N_1) и инновационном (N_2) секторах; b — переменный коэффициент, характеризующий интенсивность миграции из традиционного сектора в инновационный (миграционный член в виде произведения N_1 и N_2 отражает тот факт, что скорость миграции пропорциональна, с одной стороны, количеству людей в традиционном секторе, из которого идет миграция, а с другой — «емкости» принимающего мигрантов инновационного сектора, которая в демографическом смысле равна N_2). Динамика ВВП может быть описана следующим выражением:

$$Y = Y_1 + Y_2 = y_1(t)N_1 + y_2(t)N_2, \quad (4)$$

где Y_1 и Y_2 — ВВП, производимый соответственно в традиционном и инновационном секторах; $y_1(t)$ и $y_2(t)$ — ВВП на душу населения соответственно в традиционном и инновационном секторе, при этом $y_1(t) < y_2(t)$.

В процессе модернизации происходит изменение соотношения величин $y_1(t)$ и $y_2(t)$. Это изменение можно охарактеризовать функцией $g(t)$:

$$g(t) = (y_2(t) - y_1(t))/y_1(t), \quad (5)$$

где за точку отсчета времени t принимается начало процесса модернизации.

В процессе модернизации величина $g(t)$ поступательно растет от нуля до больших величин (однако этот рост в конце процесса модернизации замедляется, поскольку отдача от внедряемых технологий постепенно приходит в насыщение). Для развитых стран рост величины $g(t)$ определяется логикой развития научной сферы и скоростью внедрения новых технологий

³ Этот процесс может развиваться дальше и проводить к общему снижению численности населения.

в производство. Для развивающихся стран рост величины $g(t)$ определяется в основном диффузией инноваций из развитых стран.

Уравнения (1)–(5) представляют собой базовую модель модернизации. Для дальнейшей ее конкретизации необходимо доопределить вид функций $a_1(t)$, $a_2(t)$, $b(t)$, $y_1(t)$, $g(t)$, входящих в эти уравнения в качестве изменяемых во времени коэффициентов. Поскольку целью данного исследования является попытка на основе эмпирических данных создать общую модель процессов модернизации, то желательно, чтобы указанные коэффициенты были не функциями времени t , а функциями переменных модели N_1 и N_2 , то есть чтобы система уравнений была автономной⁴. С этой точки зрения целесообразно описать изменение коэффициентов модели в зависимости от изменения величины N_2/N_1 , характеризующей соотношение инновационного и традиционного секторов в обществе. Рассмотрим последовательно каждый из указанных коэффициентов.

Коэффициент демографического воспроизводства a_1 в ходе процесса модернизации растет от нуля до некоторого постоянного значения (прежде всего вследствие снижения детской смертности в сельской местности). Коэффициент демографического воспроизводства a_2 в ходе процесса модернизации постепенно снижается до нуля (вследствие снижения рождаемости в городской местности). Поскольку в рамках модели изменение a_1 и a_2 зависит от стадии, на которой находится модернизация общества (которая в свою очередь характеризуется значением величины N_2/N_1 , отражающим степень вовлеченности населения в инновационный сектор), то коэффициенты a_1 и a_2 могут быть представлены как функции величины N_2/N_1 , например в виде

$$a_1 = \frac{a_{11} \frac{N_2}{N_1}}{\frac{N_2}{N_1} + a_{12}}, \quad (6)$$

$$a_2 = \frac{a_{21}}{\frac{N_2}{N_1} + a_{22}}, \quad (7)$$

где a_{ij} — параметры, учитывающие специфику демографических процессов в рассматриваемом обществе.

Типовой вид зависимостей a_1 и a_2 , соответствующих (6) и (7), представлен на рис. 4.

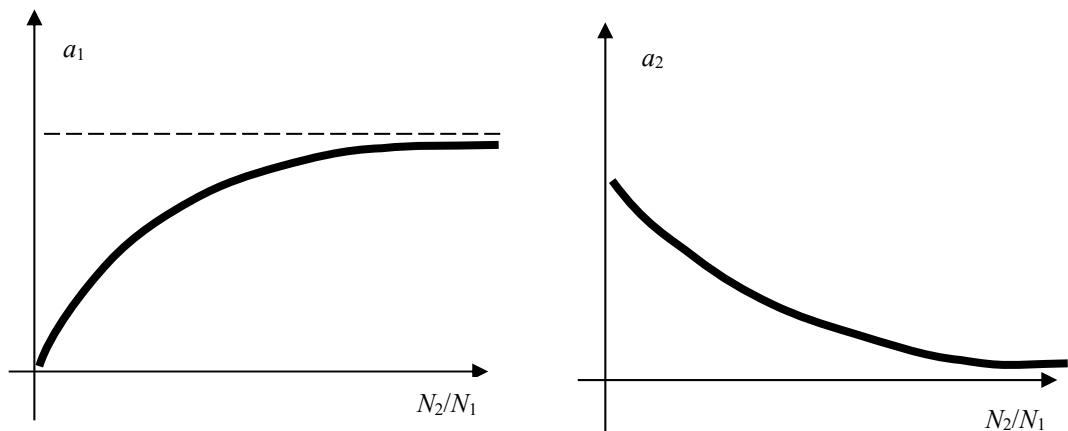


Рис. 4. Типовой вид зависимостей a_1 и a_2 , характеризующих воспроизводство населения в традиционном и инновационном секторах общества в ходе модернизации

⁴Автономная система дифференциальных уравнений — частный случай, когда аргумент t не входит явным образом в функции, задающие систему.

Величина коэффициента миграции b зависит от того, насколько сильно отличаются величины y_1 и y_2 в инновационном и в традиционном секторах, насколько привлекательнее инновационный сектор по отношению к традиционному. В простейшем случае примем, что значение b прямо пропорционально значению g , то есть чем сильнее значение y_1 превышает значение y_2 , тем интенсивнее миграционный поток из традиционного сектора в инновационный:

$$b = b_0 \cdot g, \quad (8)$$

где b_0 — коэффициент пропорциональности.

При этом величина g в ходе процесса модернизации растет. Будем в рамках модели считать, что g растет от нуля до некоторого постоянного значения (поскольку отдача от внедряемых технологий постепенно приходит в насыщение):

$$g = \frac{g_0 \frac{N_2}{N_1}}{\frac{N_2}{N_1} + k}, \quad (9)$$

где g и k — коэффициенты. Типовой вид зависимости $g(N_2/N_1)$ аналогичен виду зависимости $a_1(N_2/N_1)$ (см. рис. 4).

В соответствии с (4) ВВП рассматриваемой страны с учетом обоих секторов описывается выражением

$$Y = Y_1 + Y_2 = y_1 N_1 + y_2 N_2 = y_1 (N_1 + N_2(g + 1)). \quad (10)$$

Население страны равно

$$N = N_1 + N_2. \quad (11)$$

Уравнения (1)–(11) представляют собой модель модернизации, где все величины являются функциями от N_2/N_1 .

Необходимо отметить, что, хотя обоснование модели проводилось на примере, когда под миграцией понимался переезд сельских жителей из деревень в города, реально миграции существенно шире. Например, миграцией из традиционного сектора в инновационный может быть переход сельского населения от традиционных методов обработки земли с использованием в основном ручного труда к фермерскому хозяйству, основанному на использовании современной техники.

Материалы и методы. Апробация модели

Работоспособность модели (1)–(11) необходимо проверить на реальных данных мировой статистики. Модель была верифицирована на статистических данных следующих стран: Соединенные Штаты Америки, Канада, Великобритания, Франция, Германия, Испания, Австрия, Италия, Бельгия, Бразилия, Япония, Китай, Турция, Египет, Иран, Индия, Индонезия. Страны выбирались таким образом, чтобы в их число вошли представители с различным уровнем развития (развитые и развивающиеся страны), а также страны из различных регионов мира (Северная Америка, Южная Америка, Европа, Азия, Африка).

Одной из основных задач являлось определение параметров модели a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} , g_0 , b_0 , k , y_1 , N_{10} , N_{20} на основе имеющихся статистических данных (в рамках данной работы было принято допущение, что y_1 является постоянной величиной; N_{10} и N_{20} — начальные значения N_1 и N_2). Эмпирическими данными для идентификации указанных параметров послужили статистические ряды численности населения и ВВП вышеперечисленных стран за период 1500–2016 годов. Данные были собраны из двух источников:

- историческая база данных, созданная Ангусом Мэддисоном [Мэддисон, 2010];
- Всемирный банк (предоставляющий данные начиная с 1960 года) [Всемирный банк].

Для удобства расчетов обе базы данных были объединены в одну таблицу. Данные были выражены в относительных единицах, где единица — значение соответствующего показателя (численности населения, ВВП) в начальном году расчета. Вычисления по модели производились начиная либо с 1500 года, либо с 1820 (в зависимости от конкретной страны).

Для идентификации параметров использовался специально разработанный программный комплекс, в котором рассчитывается квадратичная функция невязок, являющаяся суммарным отклонением теоретических рядов значений численности населения и ВВП от их реальных статистических значений на интервале 1500–2016 годов. Для каждой страны находится такой набор параметров, при подстановке которого в модель значение функции невязок минимально. Многопараметрическая задача поиска минимума решается методом случайного спуска, реализованного в программном комплексе. Более подробно с данным инструментом можно ознакомиться в работе [Максимов, Филипповская, 1982].

Результаты исследования

В результате процедуры идентификации были определены параметры для каждой из стран (см. табл. 1).

Ниже на рис. 5 представлено сопоставление статистических данных и расчетных данных, полученных путем подстановки в модель идентифицированных параметров для каждой из перечисленных выше стран.

Видно, что, несмотря на свою простоту, модель хорошо описывает долгосрочную демографическую и экономическую динамику в различных странах мира (как развитых, так и развивающихся) в период глобальных перемен. Отклонения расчетных кривых от статистических данных, как правило, наблюдаются в периоды войн и экономических кризисов, которые не учитываются моделью. Обращает на себя внимание расхождение расчетных и эмпирических данных по экономической динамике Великобритании во второй половине XX века. Возможно, это связано с тем, что в этот период значительную часть доходов в этой стране стала приносить не производственная, а финансовая деятельность. Также обращают на себя внимание в таблице 1 отрицательные значения коэффициента a_{12} : таким способом в рамках модели косвенно учитывается то, что в США и Канаде пополнение населения в существенной степени происходило за счет эмигрантов.

Таблица 1. Параметры модели, полученные в результате процедуры идентификации с использованием статистических данных для ряда стран

	a_{11}	a_{22}	a_{12}	g_0	b_0	y_1	a_{21}	k
США	0.09	0.65	-0.03	31.34	0.0003	0.94	0.77	0.03
Канада	0.11	0.88	-0.01	30.90	0.0004	0.96	0.65	0.00
Великобритания	0.11	0.87	0.15	14.29	0.0022	1.03	0.11	0.24
Франция	0.04	1.37	0.02	46.13	0.0032	1.05	0.04	0.44
Германия	0.09	0.8	0.18	24.35	0.0049	1.14	0.19	1.35
Испания	0.29	1.15	0.82	22.40	0.0123	1.19	0.05	1.02
Австрия	0.12	0.83	0.37	34.47	0.0058	1.10	0.07	0.78
Италия	0.08	0.93	0.14	16.11	0.0150	0.98	0.15	1.63
Бельгия	0.05	0.96	0.01	30.54	0.0021	1.11	0.17	1.01
Бразилия	0.92	0.77	0.46	13.18	0.0016	1.03	0.23	0.10
Япония	0.29	1.20	0.22	46.50	0.0060	1.02	0.00	0.18
Китай	0.08	1.15	0.03	10.23	0.0752	0.86	0.58	1.25
Турция	1.05	1.16	0.72	10.01	0.0408	1.08	0.01	0.04
Египет	0.33	1.25	0.04	24.77	0.0030	1.01	0.12	0.02
Иран	1.04	1.07	0.77	10.78	0.0241	0.94	0.04	0.02
Индия	0.93	1.43	0.65	4.97	0.0596	1.00	0.00	0.12
Индонезия	0.21	1.61	0.02	22.26	0.0058	0.99	0.12	0.18

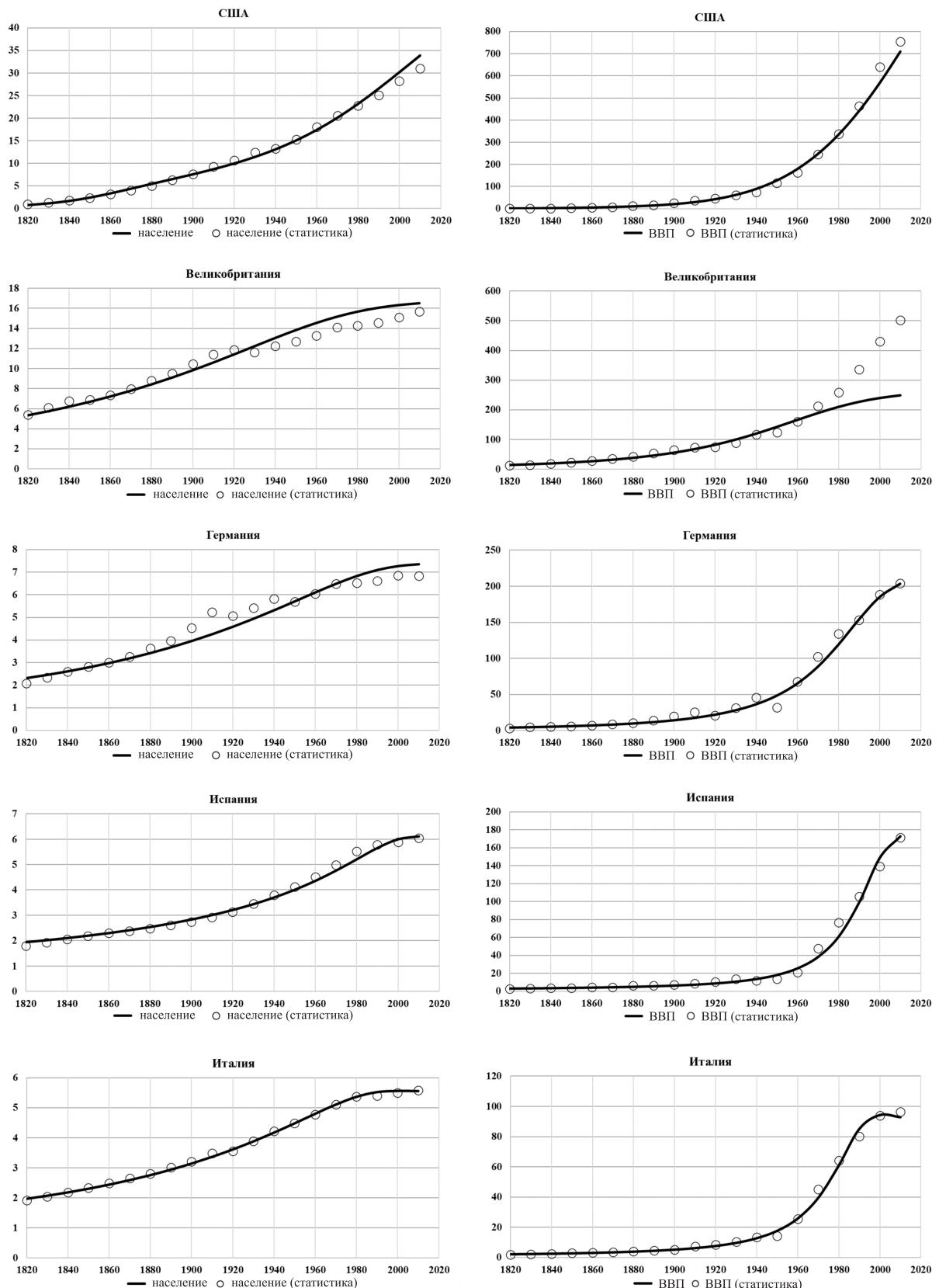


Рис. 5. Сопоставление расчетных (сплошная линия) и статистических (маркеры) данных, отражающих динамику населения и ВВП в рассмотренных странах

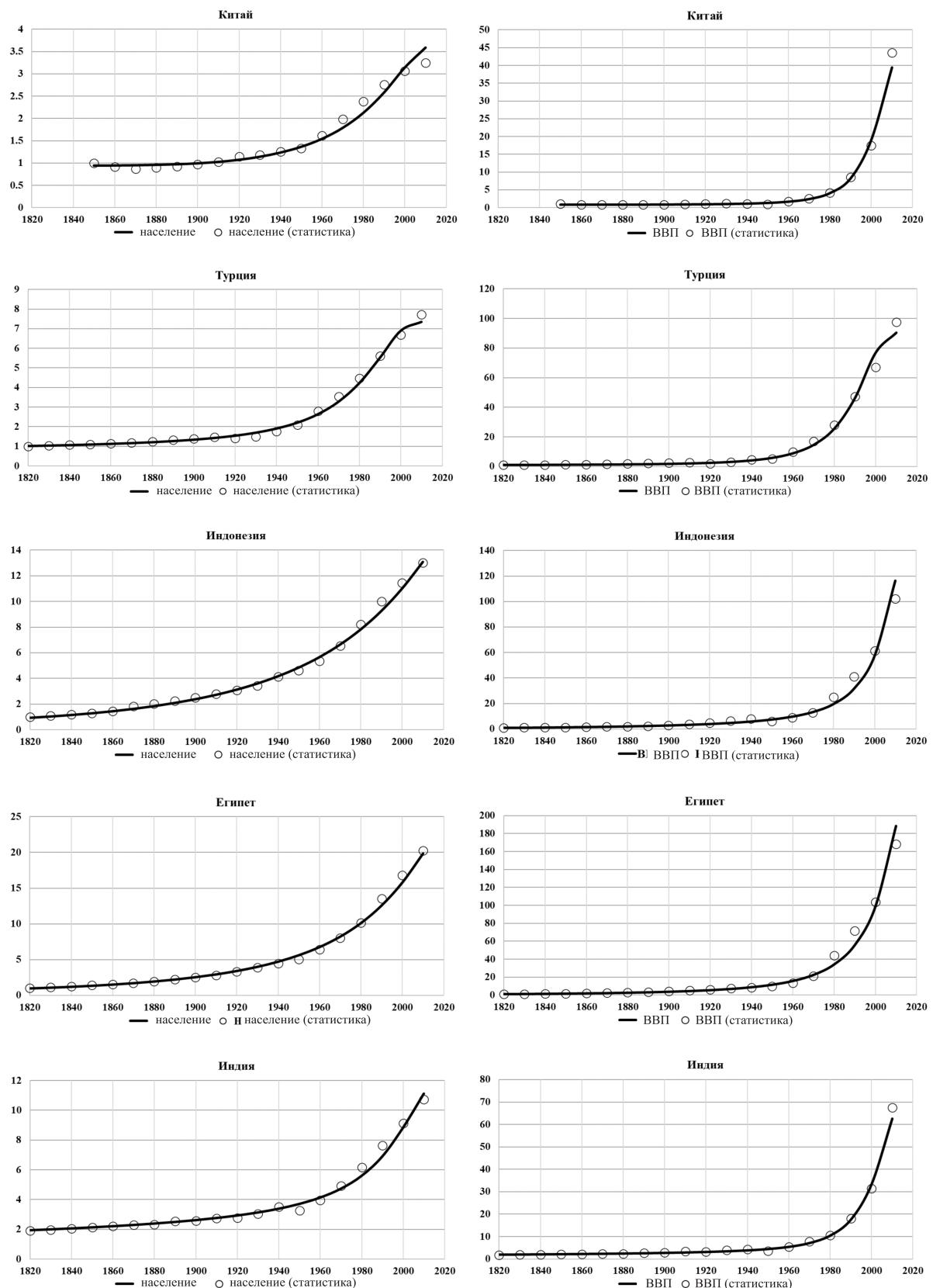


Рис. 5. Сопоставление расчетных (сплошная линия) и статистических (маркеры) данных, отражающих динамику населения и ВВП в рассмотренных странах (окончание)

Интересно выяснить, какие страны близки друг к другу по значениям параметров (а значит, и протеканию процесса модернизации). Для этого страны были разделены на группы с помощью метода иерархической кластеризации, в ходе которого строится иерархия (дерево) вложенных кластеров. В работе был использован агломеративный метод, в котором новые кластеры образуются посредством объединения более мелких кластеров. На начальном этапе определяются и образуют новый кластер объекты (страны), евклидовы расстояния между которыми в пространстве значений параметров минимальны. Для расчета расстояний между кластерами применяется метод полной связи, в котором расстояние между двумя кластерами считается равным максимальному расстоянию между двумя элементами из разных кластеров. Для наглядного представления результатов кластеризации построена дендрограмма с использованием библиотек `hcluster` и `matplotlib` языка программирования Python (см. рис. 6).

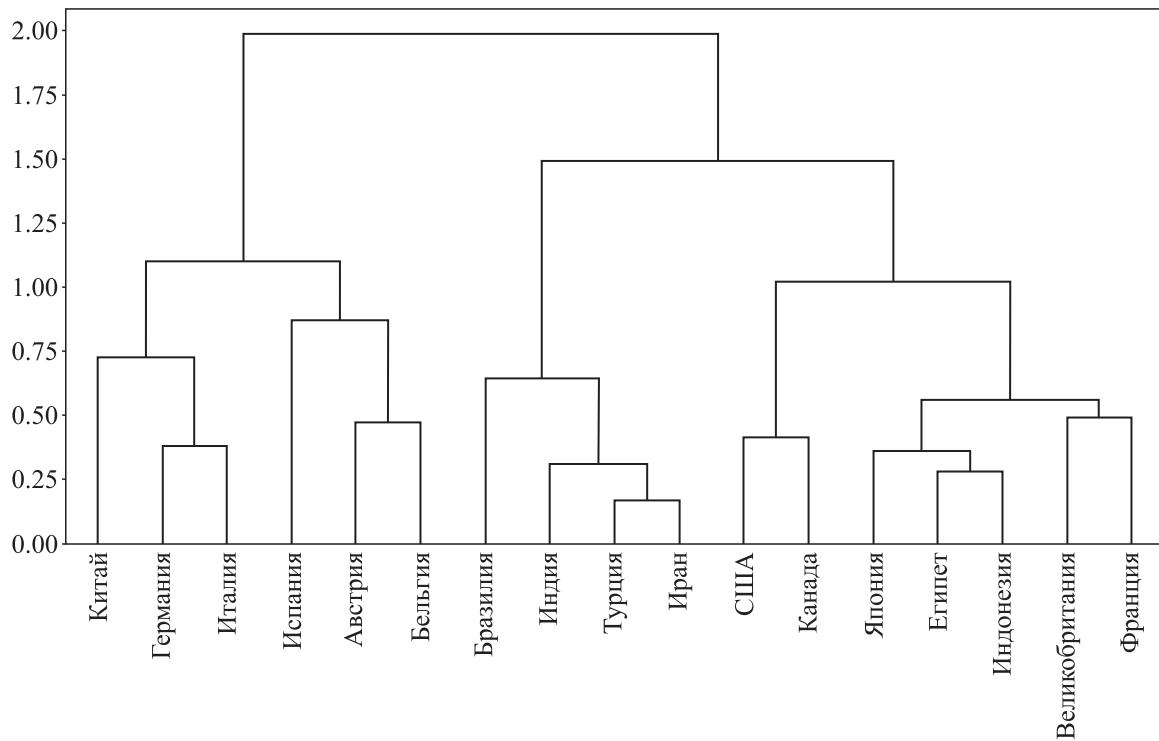


Рис. 6. Дендрограмма, отражающая кластеризацию стран в пространстве значений параметров модели

По результатам кластеризации выделяются следующие кластеры:

- А) Соединенные Штаты Америки – Канада;
- Б) Австрия – Бельгия – Испания – Италия – Германия – Китай;
- В) Бразилия – Индия – Иран – Турция;
- Г) Великобритания – Франция;
- Д) Египет – Индонезия – Япония.

Видно, что рассмотренные государства группируются в кластеры достаточно ожидаемым образом: развитые страны — с развитыми, развивающиеся — с развивающимися. Разделение на кластеры отражает особенности протекания процессов модернизации. Например, для развитых государств характерна следующая динамика: сначала наблюдается одновременный рост численности населения и ВВП на душу населения, после чего ВВП на душу населения опережает рост населения, затем происходит торможение роста численности населения и темпов ВВП. По существу, выявленные кластеры отражают различные модели модернизации, отражающие специфику рассматриваемых стран. При этом интересно, что Китай попал в кластер западноевропейских стран второй волны развития (в которых модернизация происходила несколько позже, чем у лидеров — Великобритании и Франции), а не в кластер развивающихся

стран Азии. Это косвенно указывает, по-видимому, на то, что процессы модернизации в Китае носят фундаментальный характер и он в экономико-демографическом плане идет по европейскому типу развития.

Разделение на кластеры полезно тем, что, получив информацию о том, к какому кластеру относится конкретная страна, можно с большей обоснованностью прогнозировать ее дальнейшую экономико-демографическую динамику.

Заключение

Анализ эмпирических данных по долгосрочной демографической и экономической динамике стран мира позволил выделить общие закономерности и формализовать их в виде математической модели. Модель представляет собой автономную систему дифференциальных уравнений, в общем виде описывающую процесс модернизации. Тестирование модели показало ее высокое качество применительно к описанию долгосрочных демографических и экономических изменений в развитых и развивающихся странах в период происходящего в течение последних столетий перехода от аграрного общества к индустриальному и постиндустриальному. В дальнейшем предполагается развитие данной модели и ее использование для анализа и прогноза демографической и экономической динамики в различных странах мира.

Список литературы (References)

- Вебер М.* Протестантская этика и дух капитализма. Избранные произведения / пер. с немецкого и общая редакция: Ю. Н. Давыдов. — М.: Прогресс, 1990. — С. 44–271.
Weber M. Die Protestantische Ethik und der «Geist» des Kapitalismus. 1905. (Russ. ed.: Veber M. Protestantskajajetika i duh kapitalizma. Izbrannye proizvedenija / per. s nemeckogo i obshhaja redakcija: Ju. N. Davyдов. — Moscow: Progress, 1990. — P. 44–271.)
- Выборка [Всемирный банк]: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD> (дата обращения: 05.12.2020).
Training dataset [World Bank]: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD> (accessed: 05.12.2020).
- Гавров С. Н.* Социокультурные процессы модернизации // Вопросы социальной теории. — 2009. — Том III, вып. 1 (3).
Gavrov S. N. Sociokul'turnye processy modernizacii [Sociocultural processes of modernization] // Questions of social theory. — 2009. — Vol. III. Iss. 1 (3) (in Russian).
- Гринин Л. Е.* Из мальтизианской ловушки в ловушку модернизации. К прогнозированию динамики политической нестабильности в странах мир-системной периферии // Проекты и риски будущего: концепции, модели, инструменты, прогнозы. — М.: URSS, 2017.
Grinin L. E. Iz mal'tuzianskoj lovushki v lovushku modernizacii. K prognozirovaniyu dinamiki politicheskoy nestabil'nosti v stranah mir-sistemnoj periferii [From the Malthusian trap to the modernization trap. To predicting the dynamics of political instability in the countries of the world-system periphery] // Projects and risks of the future: concepts, models, tools, forecasts. — Moscow: URSS, 2017 (in Russian).
- Гринин Л. Е.* Мальтизианско-марксова «ловушка» и русские революции // О причинах русской революции / ред. Л. Е. Гринин, А. В. Коротаев, С. Ю. Малков. — М.: Издательство ЛКИ, 2010. — С. 198–224.
Grinin L. E. Mal'tuziansko-marksova «lovushka» i russkie revoljucii / red. L. E. Grinin, A. V. Korotaev, S. Ju. Malkov [Malthusian-Marxian «trap» and Russian revolutions] // On the causes of the Russian revolution / ed. L. E. Grinin, A. V. Korotaev, S. Yu. Malkov. — Moscow: LKI Publishing House, 2010. — P. 198–224 (in Russian).
- Гринин Л. Е., Коротаев А. В.* Циклы, кризисы, ловушки современной мир-системы. Исследование кондратьевских, жюгляровских и вековых циклов, глобальных кризисов, мальтизианских и постмальтизианских ловушек / отв. ред. С. Ю. Малков. — М.: Издательство ЛКИ, 2012.

- Grinin L. E., Korotaev A. V. Cikly, krizisy, lovushki sovremennoj mir-sistemy. Issledovanie kondrat'evskih, zhjugljarovskih i vekovyh ciklov, global'nyh krizisov, mal'tuzianskih i postmal'tuzianskih lovushek [Cycles, crises, traps of the modern world-system. Research of Kondratieff, Juglar and secular cycles, global crises, Malthusian and post-Malthusian traps] / ed. S. Yu. Malkov. — Moscow: LKI Publishing House, 2012 (in Russian).*
- Капица С. П. Общая теория роста человечества: сколько людей жило, живет и будет жить на Земле. — М.: Наука, 1999.*
- Kapitsa S. Obshchaja teorija rosta chelovechestva: skol'ko ljudej zhilo, zhiyot i budet zhit' na Zemle [General theory of human growth: How many people have lived, live and will live on Earth]. — Moscow: Nauka, 1999 (in Russian).*
- Коротаев А. В., Малков А. С., Халтурина Д. А. Законы истории: Математическое моделирование развития мир-системы. Демография, экономика, культура / отв. ред. Н. Н. Крадин. — М.: КомКнига, 2007.*
- Malkov A. S., Korotaev 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] / ed. by N. N. Kradin. — Moscow: KomKniga, 2007 (in Russian).*
- Коротаев А. В., Малков С. Ю., Бурова А. Н., Зинькина Ю. В., Ходунов А. С. Ловушка на выходе из ловушки. Математическое моделирование социально-политической дестабилизации в странах мир-системной периферии и события «арабской весны» 2011 года // Моделирование и прогнозирование глобального, регионального и национального развития / отв. ред. А. А. Акаев, А. В. Коротаев, Г. Г. Малинецкий, С. Ю. Малков. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. — С. 210–276.*
- Korotaev A. V., Malkov S. Ju., Burova A. N., Zin'kina Ju. V., Hodunov A. S. Lovushka na vyhode iz lovushki. Matematicheskoe modelirovanie social'no-politicheskoy destabilizacii v stranah mir-sistemnoj periferii i sobytija «arabskoj vesny» 2011 goda [Trap at the exit from the trap. Mathematical modeling of socio-political destabilization in the countries of the world-system periphery and the events of the 2011 Arab Spring] // Modeling and forecasting of global, regional and national development / exe. ed. A. A. Akaev, A. V. Korotaev, G. G. Malinetskiy, S. Yu. Malkov. — Moscow: Book house «LIBROKOM», 2012. — P. 210–276 (in Russian).*
- Максимов Ю. А., Филипповская Е. А. Алгоритмы решения задач нелинейного программирования. — М.: МИФИ, 1982.*
- Maksimov Ju. A., Fillipovskaja E. A. Algoritmy reshenija zadach nelinejnogo programmirovaniya [Algorithms for solving nonlinear programming problems]. — Moscow: MEPhI, 1982 (in Russian).*
- Малков С. Ю. Современный этап модернизации: на пути к мир-организму // Вестник МГУ. Серия XXVII. Глобалистика и geopolитика. — 2015. — № 1/2. — С. 88–109.*
- Malkov S. Yu. Sovremennyj jetap modernizacii: na puti k mir-organizmu [The modern stage of modernization: on the way to the world-organism] // Bulletin of Moscow State University. Series XXVII. Globalistics and Geopolitics. — 2015. — No. 1/2. — P. 88–109 (in Russian).*
- Мальтус Т. Опыт о законе народонаселения. Шедевры мировой экономической мысли. Т. 4. — Петрозаводск: Петроком, 1993.*
- Mal'tus T. Opty o zakone narodonaselenija. Shedevry mirovoj jekonomiceskoy mysli. Tom 4 [Experience about the law of population. Masterpieces of world economic thought. Vol. 4.] — Petrozavodsk: Petrokom, 1993 (in Russian).*
- Выборка [Мэддисон А. Историческая база данных, 2010]: <https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/releases/maddison-database-2010> (дата обращения: 20.07.2020).
- Training dataset [Maddison A. Historical Database, 2010]: <https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/releases/maddison-database-2010> (accessed: 20.07.2020).
- Медоуз Д. и др. Пределы роста / пер. с англ.; предисл. Г. А. Ягодина. — М.: Изд-во МГУ, 1991.*
- Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., and Behrens W. The Limits to Growth; A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. — New York: Universe Books, 1972. (Russ.ed.: Medouz D. i dr. Predely rosta / per. s angl.; predisl. G. A. Jagodina. — Moscow: Izd-vo MGU, 1991.)*
- Медоуз Д. и др. Пределы роста. 30 лет спустя. — М.: Академкнига, 2007.*
- Meadows D. H., Randers J., and Meadows D. L. The Limits to Growth: The 30-Year Update. — Chelsea Green Publishing, 2004. (Russ. ed.: Medouz D. i dr. Predely rosta. 30 let spustja. — Moscow: Akademkniga, 2007.)*
- Недедов С. А. О демографических циклах в истории средневековой Руси // Клио. — 2002. — № 3. — С. 193–203.*
- Nefedov S. A. O demograficheskikh ciklakh v istorii srednevekovoj Rusi [About demographic cycles in the history of medieval Russia] // Clio. — 2002. — No. 3. — P. 193–203 (in Russian).*

- Садовничий В. А., Акаев А. А., Коротаев А. В., Малков С. Ю.* Комплексное моделирование и прогнозирование развития стран БРИКС в контексте мировой динамики / Научный совет по Программе фунд. иссл. Президиума Российской академии наук «Экономика и социология науки и образования». — М.: Наука, 2014.
Sadovnichij V. A., Akaev A. A., Korotaev A. V., Malkov S. Ju. Kompleksnoe modelirovaniye i prognozirovaniye razvitiya stran BRIKS v kontekste mirovoj dinamiki. [Integrated modeling and forecasting of the development of the BRICS countries in the context of world dynamics] / Scientific Council for the fundamental research of the Presidium of the Russian Academy of Sciences «Economics and Sociology of Science and Education». — Moscow: Nauka, 2014 (in Russian).
- Эйзенштадт III. Срывы модернизации // Неприкосновенный запас.* — 2010. — № 6 (74).
Jezenshtadt Sh. Sryvy modernizacii [Disruptions of modernization] // Emergency reserve. — 2010. — No. 6 (74) (in Russian).
- Von Foerster H., Mora P. M., Amiot L. W.* Doomsday: Friday, 13 November, AD 2026 // *Science.* — 1960. — No. 132. — P. 1291–1295.
- Goldstone J.* Population and Security: How Demographic Change Can Lead to Violent Conflict // *Journal of International Affairs.* — 2002. — Vol. 56, No. 1.
- Grinin L.* State and Socio-Political Crises in the Process of Modernization // *Cliodynamics: The Journal of Theoretical and Mathematical History.* — 2012. — Vol. 3, Iss. 1. — P. 124–157.
- Kremer M.* Population Growth and Technological Change: One Million B.C. to 1990 // *The Quarterly Journal of Economics.* — 1993. — No. 108. — P. 681–716.
- Lerner D.* The Passing of Traditional Society: Modernizing the Middle East. — Glencoe, Ill.: Free Press, 1958.
- Levy M. J.* Modernization and the Structure of Societies. — Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1966.
- Levy M. J.* Social Patterns (Structures) and Problems of Modernization // *Moore W. and Cook R. M. Readings on Social Change.* Englewood Cliffs, N. J: Prentice-Hall, 1967. — P. 196–201.
- Mesarovic M., Pestel E.* Mankind at the turning point. — New York: Reader's Digest Press, 1974.
- Mol A.* Sociology, environment and modernity: ecological modernization as a theory of social change // *Society and Natural Resources.* — 1992. — Vol. 5.
- Turchin P.* Complex Population Dynamics: A Theoretical / Empirical Synthesis. — Princeton University Press, Princeton, NJ, 2003.
- Turchin P., Korotayev A.* Population Dynamics and Internal Warfare: a Reconsideration // *Social Science and History.* — 2006. — No. 5 (2). — P. 121–158.
- Wallerstein I.* The Modern World-System IV: Centrist Liberalism Triumphant, 1789–1914. 1st ed. — University of California Press, 2011.