

И. Л. Кирилюк, С. Ю. Малков, А. С. Малков

## Особенности долгосрочной экономической динамики мировой системы: анализ статистических данных<sup>1</sup>

*В статье на основе имеющихся данных проведен анализ развития мировой экономики в индустриальную эпоху. Выделены группы стран по характеру их экономической динамики. Предложена модель, описывающая процессы коэволюционного экономического развития государств в мировой системе. Сделан вывод о неизбежности «фазового перехода» в мировой экономической динамике, аналогом которого в демографии является современный демографический переход.*

### 1. Введение

В последнее время возрастает интерес к анализу данных, характеризующих взаимодействие различных государств на протяжении длительных периодов (десятки и сотни лет), и к выявлению на основе этого исторических закономерностей. Например, в статье «Математическая модель влияния взаимодействия цивилизационного центра и к варварской периферии на развитие Мир-Системы» [Коротаев, Гринин (2008)] рассматривался и моделировался процесс силового (военного) взаимодействия государств с разным уровнем политического и технологического развития в доиндустриальную эпоху. В индустриальную эпоху (XIX–XXI вв. н. э.) существенно возросла роль экономических взаимодействий между странами, в связи с чем представляет интерес рассмотрение экономического развития мировой системы, взаимного влияния экономик различных стран и связанных с ним закономерностей на основе анализа имеющихся статистических данных.

### 2. Особенности экономической динамики мировой системы

Особенностью рассматриваемого периода развития мировой системы является сугубо нелинейный характер протекающих процессов. Иллюстрацией этому служит рис. 1, отражающий изменение мирового валового внутреннего продукта (ВВП) за последние 2000 лет (данные взяты из [Коротаев, Малков и др. (2007)]).

Подобный вид имеют и многие другие макросоциальные и макроэкономические показатели — такие, как численность населения мира, ВВП на душу населения, потребление энергоресурсов и т. п. В работах [Коротаев, Малков и др. (2007)], [Капица (1999)], [Коротаев, Малков и др. (2005)] показано, что динамика этих показателей с хорошей точностью аппроксимируется степенными зависимостями типа:

<sup>1</sup> Работа поддержана РФФИ (проекты № 09-06-00052а, 08-06-00319а).

$$A(t) = \frac{C}{(t_0 - t)^k}, \quad (1)$$

где  $k > 0$  — показатель степени;

$C$  — константа (при  $k = 1$  уравнение (1) описывает гиперболический рост, т. е. аппроксимационная зависимость является гиперболой).

Характерной особенностью зависимости (1) является то, что при приближении момента времени к значению  $t_0$  значение  $A(t)$  начинает резко возрастать и устремляется к бесконечности (такое поведение называется режимом с обострением [Князева, Курдюмов (2002)], а  $t_0$  — моментом обострения). Разумеется, инфинитное изменение какого-либо показателя, особенно за конечный период времени, является математической идеализацией. Тем не менее для определенных периодов времени аппроксимация параметров инфинитными кривыми оказывается весьма точной (см., например, рис. 1, где сплошная линия — аппроксимация типа (1) с  $k = 2$ ).

ВВП,  $10^4$  млрд долл.

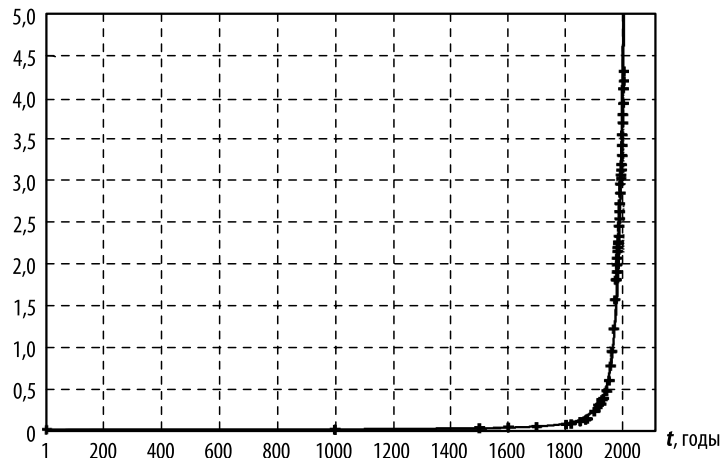


Рис. 1. Динамика мирового ВВП

Гиперболический рост отражает развитие системы с *положительными обратными связями*, когда с ростом некоторой величины создаются дополнительные благоприятные условия для ее еще большего роста. М. Кремер объясняет факт гиперболического роста численности населения Земли развитием науки и технологий [Кремер (1993)]. В современном обществе одним из механизмов положительной обратной связи является взаимное влияние нано-, био-, когнитивных и информационных технологий [Converging Technologies (2003)].

Анализ статистических данных [Кирилук, Малков и др. (2007)] показывает, что степенной рост характерен не только для упомянутых выше характеристик развития мира в целом, но и для макроэкономических показателей отдельных стран. Так, динамика удельного ВВП на душу населения (ВВП/чел.) — показателя, широко используемого для оценки уровня экономического развития — для многих развитых стран в последние столетия хорошо аппроксимируется гиперболическими зависимостями (см. рис. 2), несмотря на наличие локальных осцилляций (причина осцилляций — периодически случающиеся экономические кризисы и войны).

Убыстряющиеся темпы экономического развития в целом приводят к увеличению разрыва между странами-лидерами и странами-аутсайдерами. В то же время некоторые развивающиеся государства, изначально находившиеся на периферии мировой экономики, могут в определенный момент сделать рывок и начать развиваться с существенно более высокими темпами, чем мир в целом. Например, такие государства, как Гонконг, Сингапур, Тайвань и некоторые другие, имеют с некоторого времени существенно более крутую временную зависимость ВВП/чел., чем мир в целом или нынешний лидер — США (рис. 3).

Кстати, похожая ситуация отражена и на рис. 2: США, первоначально отстававшие от Великобритании и стран Европы по уровню ВВП/чел., в конце XIX в. сделали рывок и стали лидером экономического развития.

Для проведения сравнительного анализа параметров мирового экономического развития была проведена аппроксимация степенными зависимостями динамики значений ВВП/чел. для стран, представленных в базе А. Мэддисона<sup>2</sup>.

Аппроксимация производилась следующим образом: в исходном уравнении вида (1) производились замена переменных — переход к натуральным логарифмам от показателя ВВП/чел.,  $Y_i = \ln(A_i(t))$ , и преобразование времени по формуле

$$\tau_i = \ln(t_0 - t_i),$$

где  $i$  — номера момента времени и соответствующего показателя в ряду данных.

По  $t_0$  проводился перебор от 2004 до 3004 г. (так как использовались имеющиеся данные по 2003 г. включительно). Такое преобразование координат приводит степенное уравнение к линейному, что позволяет применить обычную линейную аппроксимацию *методом наименьших квадратов*. При этом вычислялся коэффициент детерминации  $R^2$  и находились те значения  $t_0$ , для которых он максимален.

В результате для каждой страны получали аппроксимирующую степенную зависимость с набором параметров, соответствующих наилучшей аппроксимации эмпирических данных.

Для определения статистической значимости полученных регрессионных зависимостей рассчитывалась  $F$ -статистика по формуле

$$F = \frac{R^2(N-2)}{1-R^2},$$

где  $N$  — величина выборки (длина временного ряда данных).

Величина  $F$  имеет распределение Фишера с  $\nu_1 = 1$  и  $\nu_2 = N - 2$  степенями свободы. Вычисленный критерий  $F$  сравнивался с критическим значением  $F_{кр}$  при 5%-м уровне значимости.

Оказалось, что отношение  $\frac{F}{F_{кр}}$  ни для одного государства не опускается ниже значения 2,8, т. е. для всех без исключения государств степенные аппроксимации являются статистически значимыми. Для стран с высоким коэффициентом детерминации это отношение порядка нескольких сотен.

<sup>2</sup> <http://www.ggdnet/maddison>

ВВП на душу населения, долл.

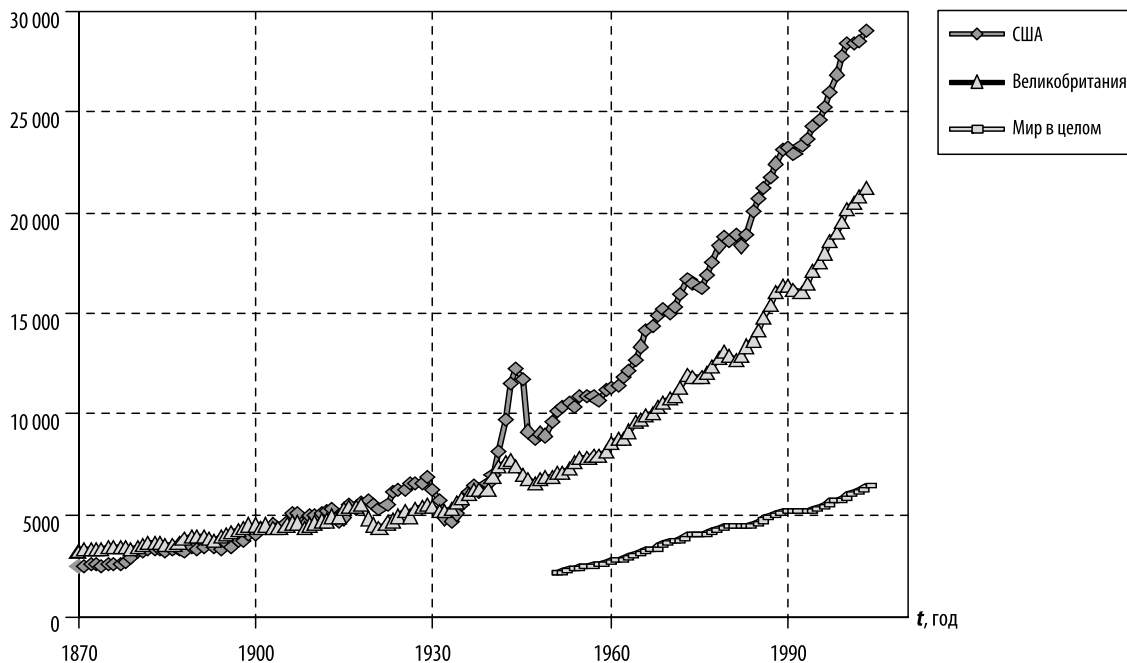


Рис. 2. Зависимость ВВП на душу населения (долл. в год) для ряда развитых стран и для мира в целом

ВВП на душу населения, долл.

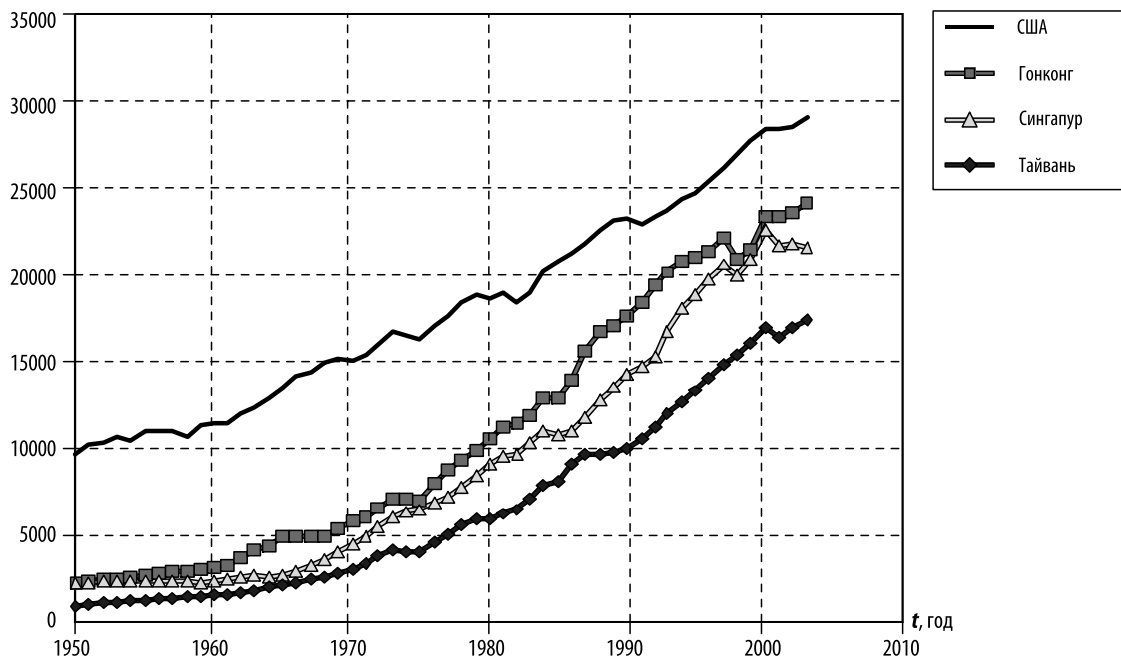


Рис. 3. Сравнение графиков зависимости ВВП на душу населения от времени для США и ряда азиатских стран

Результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы.

1. Практически для всех стран Западной Европы динамика роста ВВП/чел. с весьма высокой точностью (коэффициент детерминации  $R^2 > 0,9$ ) аппроксимируется степенной зависимостью. Множители и показатели степени аппроксимирующих функций для них близки между собой. Времена обострения  $t_0$  для всех стран кроме Англии ( $t_0 = 2027$ ) и Швейцарии ( $t_0 = 2023$ ) находятся в пределах от 2010 до 2020 г. Близкие значения показателей характерны также для таких неевропейских стран, как США, Канада, Бразилия, Мексика, Тайвань, Таиланд, Малайзия, Гонконг, Сингапур. Это группа экономически тесно связанных друг с другом государств.

2. Для мира в целом динамика роста ВВП/чел. аппроксимируется степенной зависимостью с моментом обострения в 2015 г. при значении  $R^2 = 0,93$  и с хорошей точностью соответствует характеристикам развитых европейских стран.

3. Фактически по всему миру есть страны, которые хорошо аппроксимируются степенной зависимостью ( $R^2 \geq 0,9$ ), но имеют времена обострения, отличающиеся от типичных для Западной Европы. Среди прочих это Польша, Венгрия, Чехия в Европе; Япония, Северная Корея, Пакистан, Израиль, Сирия в Азии; Аргентина, Чили, Колумбия, Коста-Рика в Латинской Америке; Ботсвана, Лесото, Мали в Африке и др.

4. Существует большое число стран, которые плохо аппроксимируются степенными функциями. Например, малые значения  $R^2 > 0,6$  характерны для стран бывшей Югославии и бывшего СССР (включая Россию), Никарагуа, Ирака, Объединенных Арабских Эмиратов, значительного количества африканских стран и др. Невысокие значения  $R^2$  при высоких темпах развития характерны для Китая и Индии.

Особенности долгосрочной экономической динамики мировой системы: анализ статистических данных

ВВП на душу населения, долл.

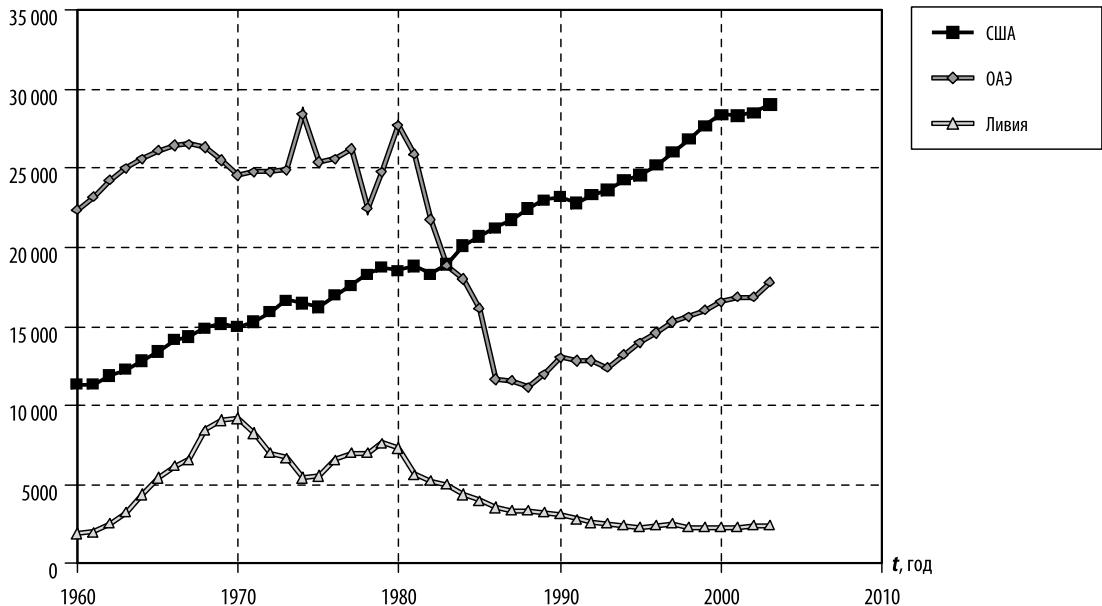


Рис. 4. Сравнительная динамика ВВП/чел. в США и в странах, динамика которых не аппроксимируется степенной функцией

Основное, что демонстрирует исследование, — наличие довольно большой группы стран со сходной динамикой ВВП/чел. (сюда входят практически все страны Западной Европы, США, Канада и ряд относительно благополучных незападных стран) и совокупности остальных стран, динамика ВВП/чел. которых имеет сильный разброс по характеристикам и носит индивидуальный характер (рис. 4).

Сходный характер динамики показателя ВВП/чел. для первой группы стран позволяет говорить о коэволюционном характере их развития, причиной которого являются тесные экономические связи и встроенность в единую экономическую систему.

Коэволюция предполагает гармоничное совместное развитие подсистем [Князева, Курдюмов (2002)]. Если принцип коэволюции нарушается, то в системе может возникнуть дисбаланс, приводящий к ее разрушению. Мы попытаемся дать некоторое формализованное описание понятия коэволюции как некое синхронизации развития подсистем, когда они достаточно эффективно эволюционируют и отставание одной подсистемы от другой не превышает определенной величины. Ниже приводится простейшая модель такой системы.

### 3. Модель коэволюционного развития динамических систем с гиперболическим ростом

Рассмотрим простую модельную систему вида:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= a_1 x^\alpha - c_1(x - y) + f(x) \\ \frac{dy}{dt} &= a_2 y^\alpha + c_2(x - y) + \varphi(y) \\ x(0) &= x_0, y(0) = y_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Уравнения (2) описывают динамику и взаимодействие двух нелинейных систем. Первая система характеризуется переменной  $x(t)$ , вторая — переменной  $y(t)$ . (Если в качестве взаимодействующих систем рассматриваются два государства, то в качестве  $x(t)$  и  $y(t)$  могут выступать такие величины, как их население, ВВП, ВВП на душу населения и т. п.) Первые члены в правых частях уравнений отражают характер роста  $x(t)$  и  $y(t)$ . Эти члены выбраны таким образом, чтобы зависимости  $x(t)$  и  $y(t)$  имели степенной вид типа (1). Показатели степени  $\alpha$  имеют значение, равное 1, для случая экспоненциального роста, 2 — для обычной гиперболы ( $k = 1$ ) и 1,5 — для случая квадратичной гиперболы ( $k = 2$ ).

Для простоты будем считать, что коэффициенты в выражении (2) постоянны и  $a = a_2$ , т. е. системы эволюционируют по одинаковым законам. При этом первая система имеет лидирующие позиции, что отражается условием  $x_0 > y_0$ . Вторые члены в правых частях уравнений (2) отражают наличие связей между рассматриваемыми системами, коэффициенты  $c_1$  и  $c_2$  характеризуют интенсивность этих связей. В качестве таких связей можно рассматривать, например, обмен материальными ресурсами — торговлю (предельный случай только материального обмена выражается равенством  $c_1 = c_2$ ) или же обмен информацией (в случае чисто информационного одностороннего влияния со стороны системы-лидера имеем  $c_1 = 0$ ). Функции  $f(x)$  и  $\varphi(y)$  нужны для описания выхода систем из развития с обострением (когда  $x(t)$  и  $y(t)$  устремляются к бесконечности). Однако нас будут интересовать ситуации до момента

обострения, и в этом случае функции  $f(x)$  и  $\varphi(y)$  могут не рассматриваться (мы будем считать их нулевыми). Все начальные условия и коэффициенты считаем положительными (это подразумевает, что система-лидер в среднем положительно влияет на другую систему, что бывает, понимается, не всегда). Аналитическое решение системы (2) в общем виде найти не удалось, однако для частных случаев аналитические решения существуют.

При  $c_1 = c_2 = 0$  получаем две изолированные (автономные, не зависящие друг от друга) системы со степенным ростом типа (1), имеющие каждая собственный (при несовпадающих начальных условиях) момент обострения  $t_0$ .

При  $c_1, c_2 > 0$  ситуация изменяется. Кривые сближаются, и момент обострения становится общим: система-лидер  $x$  «увлекает» за собой отстающую систему  $y$ , убыстряет темп ее развития. Это происходит, правда, ценой смещения момента обострения в сторону больших  $t$ . Общий момент обострения наступает позже, чем у автономной системы  $x$ , но раньше, чем у автономной системы  $y$ .

Разницу между автономным и совместным развитием двух систем при  $\alpha = 0$  демонстрирует рис. 5. Как видим, у взаимодействующих систем момент обострения становится общим, при этом темпы роста догоняющей системы становятся выше темпов роста системы-лидера. Важно, что коэволюция систем становится возможной даже при относительно слабой связи между ними.

Полученные результаты позволяют объяснить эффект опережающих темпов роста величины ВВП/чел. для ряда догоняющих стран (рис. 3). Для относительно небольших догоняющих стран система (2) может быть упрощена и сведена к одному уравнению

$$\frac{dy}{dt} = a_2 y^\alpha + c_2(x - y) + \varphi(y), \quad (3)$$

где переменная  $x$ , характеризующая страну-лидера, изменяется независимо от догоняющей страны (так, обратное влияние, например, Гонконга на США можно считать пренебрежимо малым) и задается извне (например, в соответствии с уравнением (1)).

Уравнение (3) решалось численно методом Рунге-Кутты. На рис. 6 приведено решение  $y(t)$  уравнения (3) (правая кривая) при заданной зависимости  $x(t)$  (левая кривая), имевшей степенной вид. Поскольку расчеты проводились до момента обострения, то считалось, что  $\varphi(y) = 0$ .

Из сравнения рис. 5 и 6 видно, что, несмотря на свою простоту, модель (3) достаточно хорошо отражает наблюдаемую экономическую динамику в системе взаимодействующих государств с разными уровнями развития.

В целом наличие общего момента обострения, как следует из модели (2), является ярким индикатором того, что рассматриваемые государства (возможно, очень несхожие по другим показателям) образуют целостную экономическую систему, находятся в режиме коэволюции.

С этой точки зрения, можно говорить о том, что страны Западной Европы, США, Канада, Бразилия, Тайвань, Малайзия, Гонконг, Сингапур и ряд других, имеющие близкие моменты обострения для величины ВВП/чел., составляют единую коэволюционирующую экономическую систему, своеобразный макроэкономический кластер.

Дополнительная информация об экономической эволюции мировой системы может быть получена из анализа распределения стран мира по величине ВВП/чел.

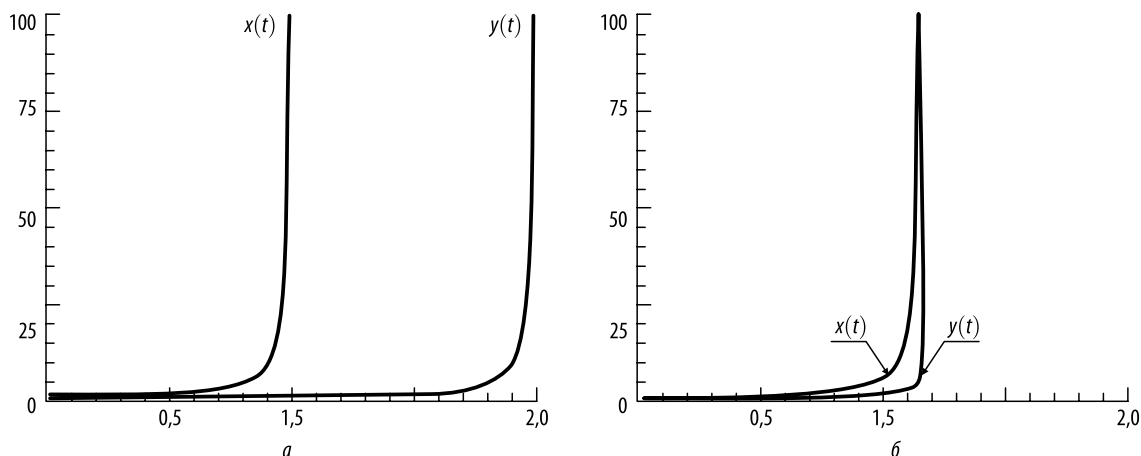


Рис. 5. Различие между автономным (а) и связанным (совместным) (б) развитием двух систем при различии стартовых условий ( $x_0 > y_0$ )

Примечание. Время  $t$  отображается по оси абсцисс в относительных единицах.

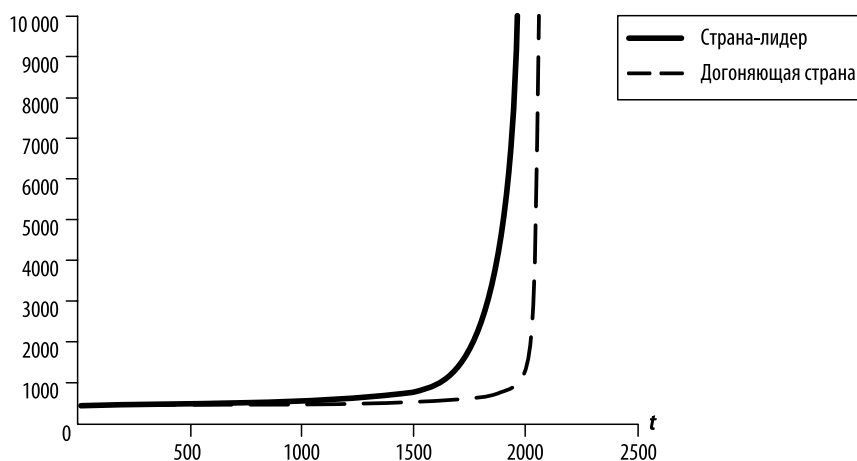


Рис. 6. Динамика взаимодействия догоняющей страны и страны-лидера согласно модели 3

Примечание. Время  $t$  отображается по оси абсцисс в относительных единицах.

#### 4. Распределение стран мира по уровню экономического развития

Интересные результаты дает анализ особенностей распределения стран мира по величине ВВП/чел. в формате «ранг—размер» (когда страны ранжируются в соответствии с величиной их ВВП/чел.: чем больше ВВП/чел., тем меньше значение  $r$ , характеризующее ранг страны).

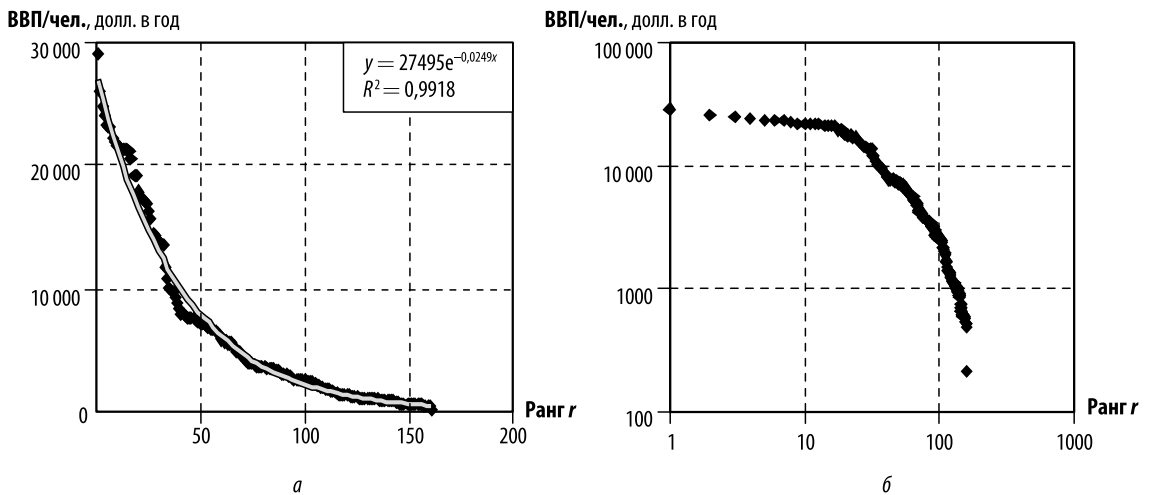
Распределение «ранг—размер» стран мира по величине их ВВП/чел. в 2003 г. приведено на рис. 7. Из рис. 7а видно, что данное распределение хорошо аппроксимируется экспонентой (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,99$ ), особенно для стран с относительно низким значением ВВП/чел.



Страны с высоким значением ВВП/чел. явно выпадают из этой зависимости (это особенно наглядно видно на рис. 7б, где данные представлены в логарифмическом масштабе). Для стран с высоким значением ВВП/чел. более характерна степенная аппроксимация (в логарифмическом масштабе она имеет вид прямой линии) вида:

$$w(r) = \frac{a}{r^b}, \quad (4)$$

где  $r$  — ранг (порядковый номер страны в ряду по степени уменьшения значения ВВП/чел.);  $w(r)$  — значение ВВП/чел. в рассматриваемом году в стране, имеющей ранг  $r$ ;  $a$  и  $b$  — положительные коэффициенты.



**Рис. 7.** Распределение «ранг—размер» стран мира по величине их ВВП/чел. (долл.) в 2003 г.:  
а — исходный масштаб; б — логарифмический масштаб

Более детальный анализ подтверждает предположение о разном типе рангового распределения для стран с высоким и низким значениями ВВП/чел.

На рис. 8 представлено ранговое распределение (в логарифмических координатах) наиболее развитых стран Западной Европы, США, Канады и Австралии по величине их ВВП/чел. для трех временных срезов (1950, 1975 и 2000 гг.).

На рис. 9 представлено ранговое распределение незападных стран с населением, превышающим 10 млн чел. (на 2000 г.), которое имеют среднее и низкое значение ВВП/чел. (ограничения на количество населения введены, чтобы исключить мелкие государства, играющие незначительную роль в мировой экономике).

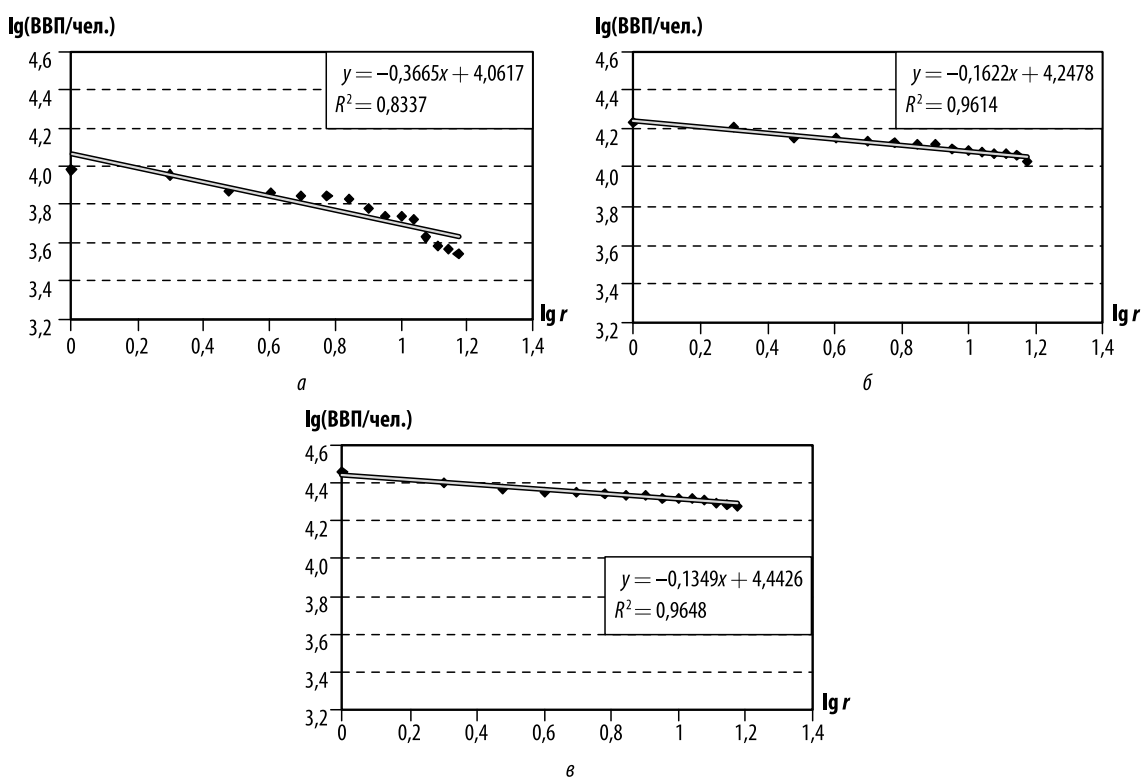
Исходя из анализа представленных данных можно сделать следующие выводы.

1. Среди стран мира можно выделить два крупных кластера, каждый из которых описывается своим ранговым законом распределения:

- кластер, включающий развитые страны Западной Европы, США, Канаду, Австралию (15 государств);
- кластер незападных стран со средним и низким значениями ВВП/чел. (большинство государств мира).

Кроме того, можно выделить кластер примерно из 15 стран, составляющих переходную группу между первым и вторым кластерами.

2. Первый кластер (развитые страны Запада) хорошо описывается *степенным* ранговым распределением, что свидетельствует о том, что эти страны представляют собой единое системное целое (по крайней мере, в экономическом смысле). Степенные распределения возникают в результате интенсивного конкурентного взаимодействия развивающихся систем [Трубников (1993)], [Подлазов]. Такие отношения действительно характерны для данной группы государств. При этом рис. 8 свидетельствует, что разница уровней ВВП/чел. для государств этой группы с течением времени уменьшается, а ранговое распределение все лучше описывается степенным законом (значение коэффициента детерминации  $R^2$  увеличивается), т. е. первый кластер становится все более однородным.

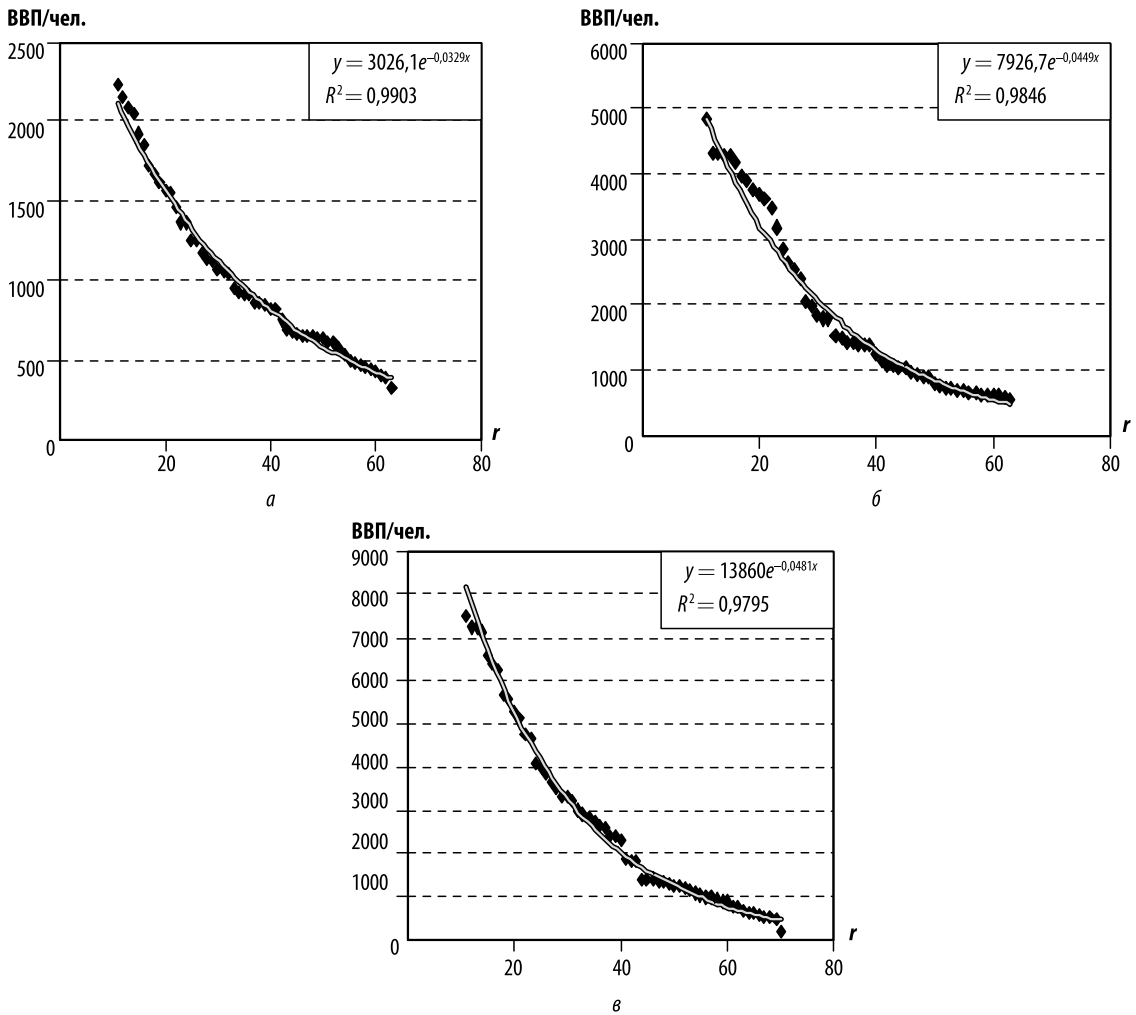


**Рис. 8.** Ранговое распределение (в логарифмических координатах) наиболее развитых стран Западной Европы, США, Канады и Австралии по величине их ВВП/чел. для трех временных срезов: а — 1950 г.; б — 1975 г.; в — 2000 г.

3. Второй кластер на протяжении всего послевоенного периода хорошо описывается *экспоненциальным* ранговым распределением (см. рис. 9). Дать убедительную интерпретацию устойчивости экспоненциальной аппроксимации для этого кластера пока не удалось. Возможно, экспоненциальный вид распределения свидетельствует о слабости системных связей внутри этого кластера и о превалировании внутренних процессов в экономическом развитии входящих в кластер государств. При этом минимальные значения ВВП/чел. в этом

кластере на протяжении последних 50 лет изменяются слабо, а максимальные — растут, стремясь подтянуться к странам-лидерам.

Особенности долгосрочной экономической динамики мировой системы: анализ статистических данных



**Рис. 9.** Ранговое распределение незападных стран с населением, превышающим 10 млн чел. (на 2000 г.), и имеющих среднее и низкое значение ВВП/чел. для трех временных срезов: а — 1950 г., б — 1975 г., в — 2000 г.

4. Третий (промежуточный) кластер неустойчив по составу и не поддается убедительной аппроксимации. В этот кластер входят страны, которым по каким-то причинам удалось приблизиться к странам первого кластера по уровню ВВП/чел. (причины могут быть различными: освоение передовых технологий и завоевание ниши в мировом разделении труда, поставки на мировой рынок востребованных минеральных ресурсов и т. п.).

5. Если в первом кластере однородность повышается, то во втором кластере она снижается, а в целом неоднородность распределения стран по уровню ВВП/чел. увеличивается. При этом страны-лидеры все сильнее отрываются от стран-аутсайдеров. Эта ситуация явля-

ется иллюстрацией концепции «золотого миллиарда» («золотой миллиард» — это страны первого кластера, противостоящие остальному миру).

## 5. Заключение

В целом анализ и аппроксимация макроэкономических статистических данных позволяют выявлять важные эмпирические закономерности мировой динамики, требующие теоретического осмысления.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что связи между странами-лидерами усиливаются, они находятся в режиме коэволюционного развития, их кластер становится более однородным. В то же время их разрыв с экономической периферией мировой системы нарастает.

В целом ситуация очень динамичная и неустойчивая, момент обострения (аппроксимации дают его оценку в диапазоне 2015–2020 гг.) близок. Скорее всего, близость момента обострения означает, что в ближайшие годы произойдет критическое накопление диспропорций и разбалансировка существующей модели мирового экономического развития, что приведет к кризису и кардинальному переструктурированию мировой экономики, смене парадигм, моделей и механизмов развития, к своеобразному «фазовому переходу», аналогом которого в демографии является современный демографический переход [Капица (1999)].

## Список литературы

Капица С. П. Сколько людей жило, живет и будет жить на Земле. Очерк теории роста человечества. М., 1999.

Кириллюк И. Л., Малков С. Ю., Малков А. С. Нелинейные особенности развития и взаимодействия социально-экономических систем // *Стратегическая стабильность*. 2007. № 2. С. 62–68.

Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Основания синергетики. Режимы с обострением, самоорганизация, темпомыры. СПб.: Алетейя, 2002.

Кортаев А. В., Гринин Л. Е. Математическая модель влияния взаимодействия цивилизационного центра и варварской периферии на развитие Мир-Системы // *История и математика. Модели и теории* / отв. ред. Л. Е. Гринин, А. В. Кортаев, С. Ю. Малков. М.: Изд-во ЛКИ, 2008.

Кортаев А. В., Малков А. С., Халтурина Д. А. Законы истории. Математическое моделирование исторических макропроцессов. Демография, экономика, войны / отв. ред. Н. Н. Крадин. М.: КомКнига, 2005.

Кортаев 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.

Подлазов А. В. Закон Ципфа и модели конкурентного роста (*в печати*).

Трубников Б. А. Закон распределения конкурентов // *Природа*. 1993. Т. 11. С. 3–13.

Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science (report). Kluwer Academic Publishers, 2003.

Kremer M. Population Growth and Technological Change: One Million B.C. to 1990 // *The Quarterly Journal of Economics*. 1993. № 108. P. 681–716.