

Андрей Витальевич Коротаев,
профессор, д. и. н.,
Российский государственный гуманитарный университет,
Божевольнов Юстислав Владиславович,
Физический факультет МГУ

Эконофизика и математическое моделирование взаимодействия центра и периферии Мир-Системы

Исследования в экономике, основанные на математическом моделировании поведения нелинейных систем и верификации моделей на эмпирических данных, стали возможны только в конце XX века. Это связано в равной степени как с развитием математического аппарата теории динамических систем, так и с бурным развитием информационных технологий, которые позволили собрать и обработать многочисленные ряды эмпирических данных в области экономики, социологии, финансов. Со временем результаты перестали укладываться в рамки только лишь либо математической физики, либо экономики. Эконофизика, как наука, объединила эти направления и сейчас занимает место рядом с классической экономикой, а по точности описания даже заметно ее перегоняет. Доклад посвящен опыту исследования эконофизическими методами нелинейного взаимодействия двухкомпонентной системы – центра и периферии Мир-Системы. Описана математическая модель, связывающая такие параметры порядка как грамотность, население и избыточный продукт на душу населения, произведена верификация на длинных временных рядах и построен прогноз динамики до 2050 г.

Математическая модель Мир-Системы, учитывающая взаимодействие центра и периферии

Предлагается модель, в которой мир разделен на две части – центр и периферию. В центр вошли государства ОЭСР с высоким уровнем дохода на душу населения (такие, как страны Западной Европы, США, Япония и т.д. В качестве периферии рассматривались все остальные страны.

Было выдвинуто предположение о том, что при определенных условиях *периферия может «догнать» центр* за счет диффузии разработанных в центре технологий (реально осуществляющейся вместе с диффузией капитала). Здесь нельзя рассматривать данное явление однополярно: диффузия технологий и капитала от центра к периферии становится возможной, как при экономической выгоде центра (связанной с уменьшением затрат), так и при появлении на периферии достаточного грамотного персонала.

В соответствии с соображениями, высказываемыми авторитетными исследователями (Акаев, Садовничий 2009), в предлагаемой модели был учтен *фактор ресурсных ограничений*.

Необходимо отметить, что точность математического описания макродинамики Мир-Системы заметно возрастает (в особенности для последних десятилетий), если мы закладываем в модель запаздывание между ростом грамотности и ускорением темпов экономического роста на 25–30 лет. Это неудивительно, так как грамотность в использованных нами базах данных (прежде всего базах данных ЮНЕСКО) обычно исчисляется как процент грамотных среди лиц возрастной группы 15 лет и старше. Даже в современных развивающихся странах большинство грамотных 15-летних не идут на производство, а продолжают образование (а если и идут на производство, то, как правило, занимаются са-

мым неквалифицированным трудом, где полученные ими навыки грамотности ни к какому существенному росту производительности труда не приводят). Полностью эффект выросшего уровня образованности данной возрастной когорты сказывается только через 25–30 лет, после достижения ее представителями максимального уровня своей профессиональной квалификации. По сходным причинам уровень соответствия теоретических кривых эмпирическим оценкам также несколько возрастает при допущении некоторого (около 5–10 лет) запаздывания между ростом грамотности и снижением темпов роста населения.

Итак, в модель были введены следующие *запаздывания*: 30 лет между ростом грамотности и соответствующим ростом ВВП на душу населения, 10 лет между ростом грамотности и соответствующим сокращением темпов роста численности населения.

С XIX в. (и в особенности с конца этого века) во временных рядах (и в особенности для темпов экономического роста) очень хорошо прослеживаются волны Кондратьева. В модель было внешним образом введено кондратьевское поведение с периодом 46 лет, динамика волн такова, что понижательные фазы приходятся на периоды с 1918 по 1941 гг., с 1964 по 1987 гг., повышательные — с 1895 по 1918 гг., с 1941 по 1964 гг., с 1987 по 2005 гг. Отметим, что отсутствие кондратьевских волн в мировой экономической динамике до 1870 г. отнюдь не случайно и объясняется не просто недостаточным числом точек данных (кондратьевские волны в динамике мирового ВВП до 1870 г. не прослеживаются и при увеличении числа точек данных), а целым рядом вполне серьезных объективных обстоятельств (Коротаев, Цирель 2009).

В качестве формализации всего вышесказанного предлагаются следующие математические уравнения. Пусть

- N_c — население в центре,
- S_c — «избыточный» ВВП на душу населения в центре,
- L_c — доля грамотного населения в центре,
- N_p — население на периферии,
- S_p — «избыточный» ВВП на душу населения на периферии,
- L_p — доля грамотного населения на периферии

и система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dN_c(t)}{dt} = a_c N_c(t) S_c(t) (1 - L_c(t - 10)) + \tilde{a} N_p(t) C(t) \\ \frac{dS_c(t)}{dt} = b_c S_c(t) L_c(t - 30) \left(1 - \frac{G(t)}{G_{\text{lim}}}\right) K(t) \\ \frac{dL_c(t)}{dt} = c_c L_c(t) S_c(t) (1 - L_c(t)) K(t) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dN_p(t)}{dt} = a_p N_p(t) S_p(t) (1 - L_p(t - 10)) \\ \frac{dS_p(t)}{dt} = b_p S_p(t) L_p(t - 30) \left(1 - \frac{G(t)}{G_{\text{lim}}}\right) K(t) + \tilde{b} S_c(t) C(t) \\ \frac{dL_p(t)}{dt} = c_p L_p(t) S_p(t) (1 - L_p(t)) K(t) + \tilde{c} L_p(t) C(t) \end{cases}$$

где

$$G = N_c S_c + N_p S_p \quad \sim \quad \text{общемировой ВВП (в реальности это «мировой избыточный продукт» – основная и наиболее динамичная часть мирового ВВП)}$$

$$C = \frac{S_c - S_p}{S_c + S_p} \cdot L_p \quad \text{— «коэффициент сближения», величина, описывающая взаимодействие двух компонент системы,}$$

$$G_{\text{lim}} = 350 \text{ триллионов долларов} \quad \text{— ресурсное ограничение,}$$

$$K(t) \quad \text{— кондратьевская динамика.}$$

В Табл. 1 приведены значения коэффициентов уравнений и начальные данные.

Табл. 1. Значения коэффициентов уравнений, начальные данные

Центр				Периферия				«Коэффициент сближения»	
a_c	$2,1 \cdot 10^{-5}$	N_{c0}	$1,6 \cdot 10^5$	a_p	$3,3 \cdot 10^{-5}$	N_{p0}	$9,0 \cdot 10^5$	$\tilde{a}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$
b_c	$2,7 \cdot 10^{-2}$	S_{c0}	580	b_p	$3,7 \cdot 10^{-2}$	S_{p0}	120	$\tilde{b}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
c_c	$1,4 \cdot 10^{-5}$	L_{c0}	0,42	c_p	$5,0 \cdot 10^{-6}$	L_{p0}	0,10	$\tilde{c}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$

Слагаемое $\tilde{a}N_p C$ описывает миграцию из периферии в ядро, миграцией из ядра в периферию пренебрежем, убытием населения из периферии за счет миграции также пренебрежем. Тут мы считаем, что объем миграции пропорционален грамотному населению периферии и разнице ВВП на душу населения центра и периферии (переезжают грамотные в поисках лучшей жизни).

Слагаемое $\tilde{b}S_c C$ описывает диффузию технологий и капитала на периферию. Считаем, что капитал и технологии начинают активно перетекать только при достаточном уровне грамотности взаимодействующих регионов (в связи с этим в выражение для C входит грамотность L_p), а также при достаточном разрыве ВВП на душу населения S между регионами.

Слагаемое $\tilde{c}LN_p C$ описывает диффузию грамотности в периферию.

Вторые уравнения системы (динамика S) требуют отдельной дискуссии. Уравнение Кремера — Джоунса имеет вид

$$\frac{dT}{dt} = bNT.$$

Оно описывает динамику развития технологий. М. Кремер и Ч. Джоунс предполагали, что относительные темпы роста технологии пропорциональны населению — чем больше людей, тем больше изобретателей (Kremer 1993; Jones 1995, 2003, 2005). При этом нужно учесть, что Кремер и Джоунс неявно предполагают суммирование изобретений, то есть большее число людей не просто производит большее количество инноваций, но большее количество взаимодополняющих (а не повторяющихся) инноваций. Это возможно только в том случае, если эта масса людей представляет собой связанную систему. Исследователи по сути рассматривали уравнение для Мир-Системы и утверждали, что уравнение не будет работать для ее частей.

Действительно, как мы видели выше, периферия, имея гораздо большее население, совсем не производила больше инноваций, по сравнению с ядром. Наряду с прочим, это было связано и с тем обстоятельством, что периферия не была целостной системой и не «суммировала» свои инновации: изобретения, сделанные в Африке, не развивали инно-

вазии, сделанные в Латинской Америке, и не улучшали в итоге уровень жизни в Юго-Восточной Азии.

В связи с этим мы предложили альтернативное уравнение для роста технологии, которая в нашей модели ассоциирована с S :

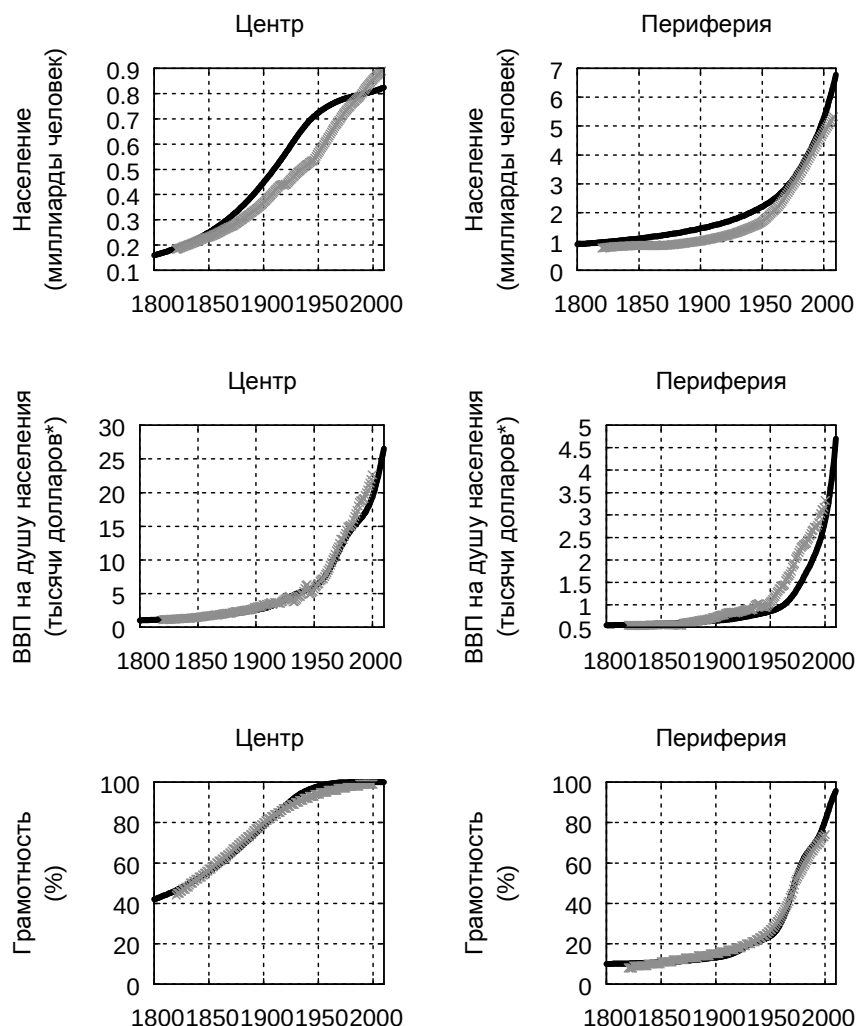
$$\frac{dS}{dt} = bSL$$

Темпы роста технологии (и ВВП на душу населения) пропорциональны уровню грамотности. То есть мы предполагаем, что именно грамотность обеспечивает аддитивность создаваемых инноваций.

Ретроспективный численный расчет с 1800 по 2010 г.

На Рис. 1 представлены результаты численного расчета на временном отрезке с 1800 по 2010 г.

Рис 1. Параметры порядка. Эмпирические и теоретические кривые



*Постоянные международные доллары 1990 г. в ППС. Здесь и далее: черные кривые – численный расчет, серые отметки – исторические данные.

На Рис. 2 представлен разрыв между центром и периферией по показателю ВВП на душу населения. На Рис. 3 представлены темпы экономического роста.

Рис. 2. Разрыв между центром и периферией по показателю ВВП на душу населения

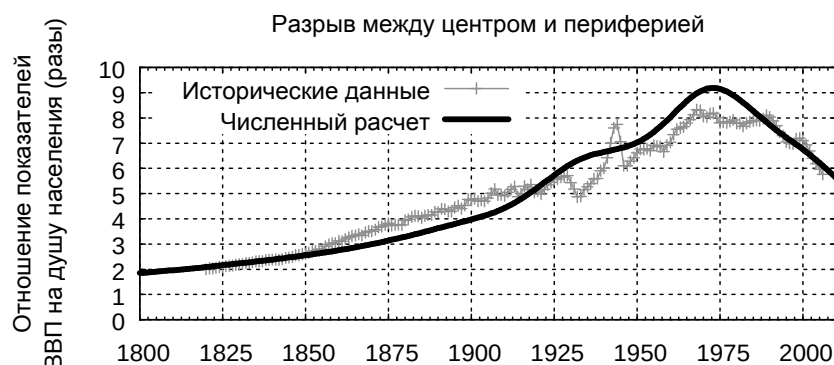
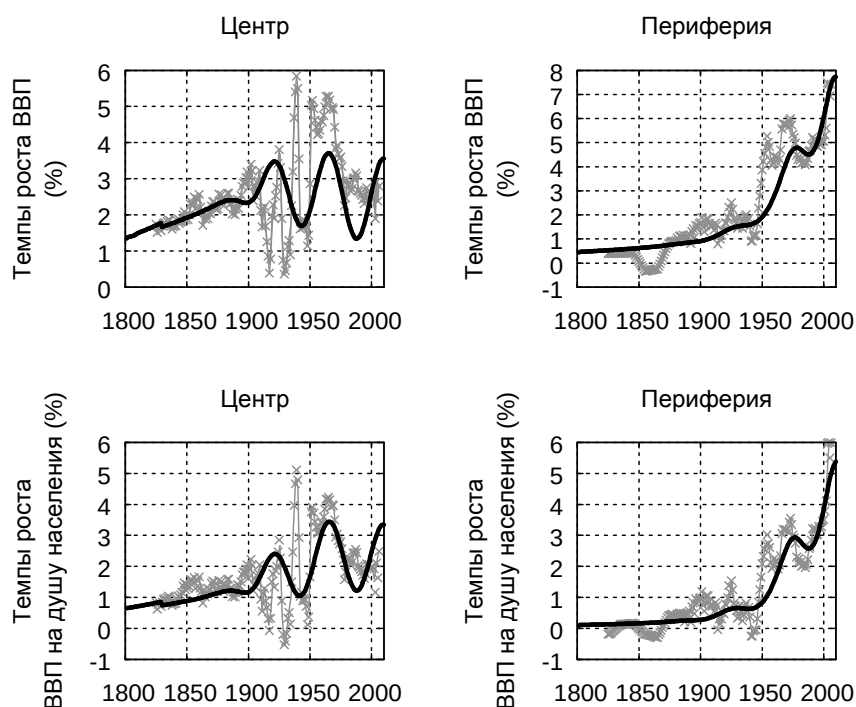


Рис 3. Показатели темпов экономического роста. Эмпирические и теоретические кривые



Прогноз

Проверка модели на исторических данных показала, что с достаточной точностью описаны основные тенденции, связывающие такие показатели как численность населения, ВВП и грамотность. Этот результат позволяет авторам использовать модель не только в ретроспективе, но и для прогноза. Горизонт прогноза выбран не случайно: полвека — это характерный масштаб времени для выбранных переменных.

Прогноз построен на основе модели, скорректированной на последней кондратьевской волне. Основные экономические показатели представлены на Рис. 4–6.

Рис. 4. Разрыв между центром и периферией по показателю ВВП на душу населения. Прогноз до 2050 г.

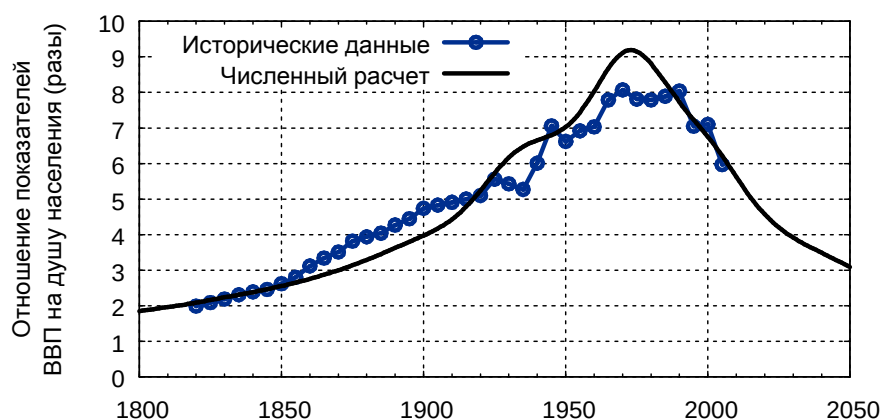
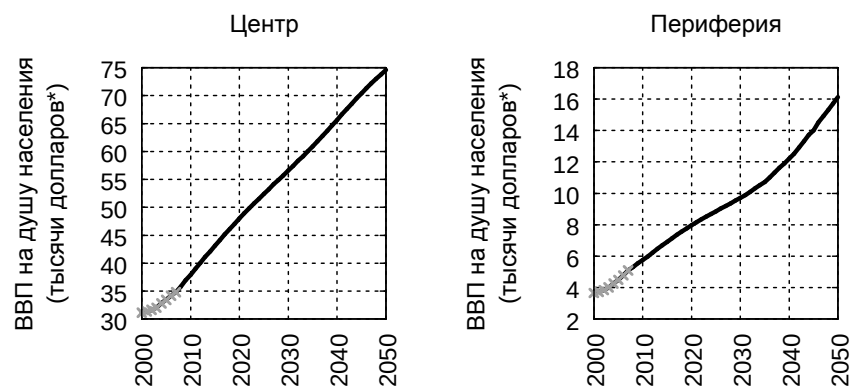


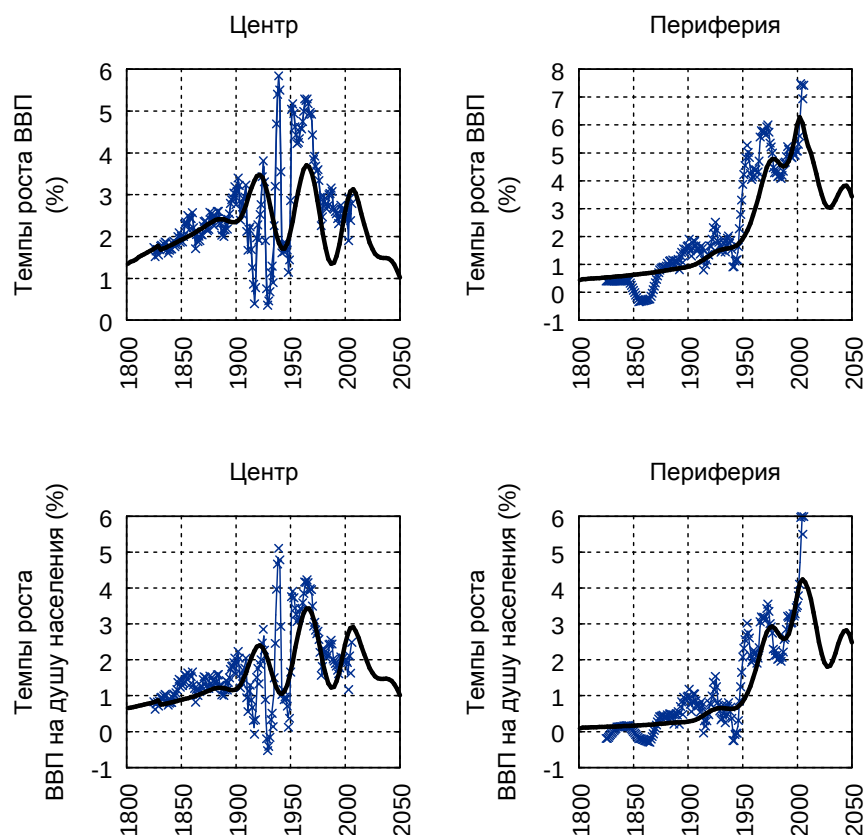
Рис 5. ВВП на душу населения. Прогноз до 2050 г.



*Постоянные доллары 2005 г. в паритете покупательной способности.

Результаты расчета по предложенной модели также позволяют сделать прогноз: сокращение разрыва между центром и периферией, наблюдавшееся с начала 1970-х годов (и особенно быстрыми темпами — начиная с конца 1980-х годов) продолжится и в ближайшие десятилетия, но будет идти несколько более медленными темпами, чем в последнее десятилетие и к 2050 г. этот разрыв (по ВВП на душу населения) сократится с современного уровня 6:1 до уровня 4:1.

Рис 6. Темпы экономического роста. Прогноз до 2050 г.

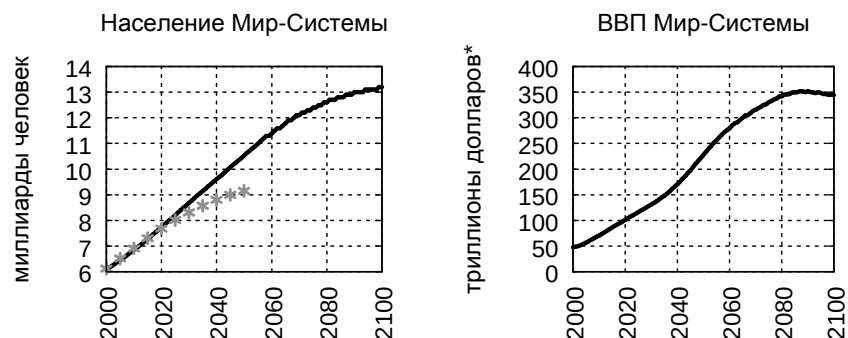


Темпы экономического роста в центре сократятся до 1%. На периферии в районе 2030 г. будет наблюдаться провал (темпы роста ВВП — до 3%, темпы роста ВВП на душу населения — до 1,7%) тем не менее к 2050 г. эти показатели все же несколько поднимутся: до 3,5% и до 2,5% соответственно.

Инерционный прогноз численности населения превысил средний вариант прогноза ООН (на Рис. 7–8 обозначен серыми звездочками). При этом видно, что при таком варианте развития в районе 2090 г. Мир-Система достигнет потолка несущей способности Земли, что отразится в падении общемирового ВВП (см. Рис. 7).

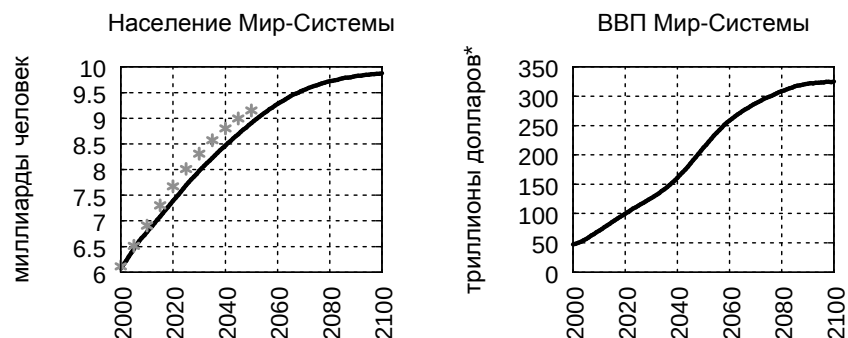
Интересен тот факт, что сценарий устойчивого развития возможен при поддержке образовательных программ на периферии со стороны центра. При расчетах, отраженных на Рис. 8, значение коэффициента, отвечающего за «перетекание» грамотности (коэффициент s в приведенных уравнениях) было увеличено в два раза против характерного для настоящего времени значения.

Рис 7. Население мира и общемировой ВВП. Инерционный прогноз до 2100 г.



* – средний прогноз ООН

Рис 8. Население мира и общемировой ВВП. Сценарий устойчивого развития. Прогноз до 2100 г.



* – средний прогноз ООН

Библиография

- Акаев А. А., Садовничий В. А. 2009.** О новой методологии долгосрочного циклического прогнозирования динамики развития мировой системы и России. *Прогноз и моделирование кризисов и мировой динамики* / Ред. А. А. Акаев, А. В. Коротаев, Г. Г. Малинецкий. М.: Наука.
- Коротаев А. В., Малков А. С., Халтурина Д. А. 2007.** Законы истории: Математическое моделирование развития Мир-Системы. Демография, экономика, культура. М.: Ком-Книга/УРСС.
- Коротаев А. В., Цирель С. В. 2009.** Кондратьевские волны в мировой экономической динамике. *Системный мониторинг глобального и регионального развития* / Ред. Д. А. Халтурина, А. В. Коротаев. М.: URSS. С. 189–229.
- Мельянцева В. А. 1996.** Восток и Запад во втором тысячелетии. М.: МГУ.
- Jones Ch. I. 1995.** R & D-Based Models of Economic Growth. *The Journal of Political Economy* 103: 759–784.
- Jones Ch. I. 2003.** Population and Ideas: A Theory of Endogenous Growth. *Knowledge, Information, and Expectations in Modern Macroeconomics: In Honor of Edmund S. Phelps* / Ed. by P. Aghion, R. Frydman, J. Stiglitz, M. Woodford. Princeton, NJ: Princeton University Press. P. 498–521.

- Jones Ch. I. 2005.** The Shape of Production Functions and the Direction of Technical Change. *The Quarterly Journal of Economics* 120: 517–549.
- Kremer M. 1993.** Population Growth and Technological Change: One Million B.C. to 1990. *The Quarterly Journal of Economics* 108: 681–716.
- Maddison A. 1995.** Monitoring the World Economy, 1820–1992. Paris: OECD.
- Maddison A. 2001.** Monitoring the World Economy: A Millennial Perspective. Paris: OECD.
- Maddison A. 2003.** The World Economy: Historical Statistics. Paris: OECD.
- Maddison A. 2009.** World Population, GDP and Per Capita GDP, A.D. 1–2006 (<http://www.ggdc.net/maddison>).
- UNESCO. 2007.** Estimates and Projections of Adult Illiteracy for Population Aged 15 Years and above, by Country and by Gender 1970-2015. URL:: <http://www.uis.unesco.org/en/stats/statistics/literacy2000.htm>.
- World Bank. 2009.** *World Development Indicators Online*. Washington, DC: World Bank, Electronic version. URL: <http://web.worldbank.org>.