



С.А. Махов

**Модели мировой динамики: развитие
и взаимодействие регионов**

Рекомендуемая форма библиографической ссылки

Махов С.А. Модели мировой динамики: развитие и взаимодействие регионов // Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности: труды 6-й Международной конференции (2-3 февраля 2023 г., Москва). — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2023. — С. 122-130. — <https://keldysh.ru/future/2023/6.pdf> <https://doi.org/10.20948/future-2023-6>

Модели мировой динамики: развитие и взаимодействие регионов

С.А. Махов

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

Аннотация. Разработана динамическая макро модель мировой динамики. В модели мир разбит на 19 регионов по географическому принципу. Внутреннее развитие регионов описывается уравнениями разностного типа для демографических и экономических индикаторов (численность населения, валовой продукт, валовое накопление). Межрегиональные взаимодействия представляют собой двусторонние торговые потоки от региона к региону и описываются регрессионными уравнениями. Рассматривались четыре типа регрессий и два вида функциональной зависимости, всего исследовано восемь вариантов торгового уравнения. Проведено сравнение качества регрессионных моделей по коэффициенту детерминации. Расчеты показывают, что модель удовлетворительно аппроксимирует динамику монотонно меняющихся показателей. Проанализирована динамика немонотонных торговых потоков, для их аппроксимации предложено три вида функциональной зависимости от времени. Построен прогноз автономного развития регионов и глобальной динамики до 2040 г.

Ключевые слова: мировая динамика, математическое моделирование, макроэкономика, внешняя торговля, временные ряды, регрессионный анализ, прогноз

Models of world dynamics: development and interaction of regions

S.A. Makhov

RAS Keldysh Institute of Applied Mathematics

Abstract. The paper present a dynamic macro model of world dynamics. The world is divided into 19 geographic regions in the model. The internal development of the regions is described by regression equations for demographic and economic indicators (Population, Gross Domestic Product, Gross Capital Formation). The bilateral trade flows from region to region describes interregional interactions and represented the trade submodel. Four types and two types of functional dependence were considered, in total eight variants of the trading equation were studied. The quality of regression models is compared by the coefficient of determination. By calculations the model satisfactorily approximates the dynamics of monotonically changing indicators. The dynamics of non-monotonic trade flows is analyzed, three types of functional depend-

ence on time are proposed for their approximation. The forecast of regional development and global dynamics up to 2040 is constructed.

Keywords: world dynamics, mathematical modeling, macroeconomics, foreign trade, time series, regression analysis, forecast

Введение

Настоящая работа является логическим продолжением работ [1,2], посвященных макро моделированию отдельных стран и их совместной торговли. Методика моделирования опирается на работы [3,4,5].

Целью исследования является прогнозирование основных тенденций и построение сценариев глобального развития. В качестве основных методов используются: а) аппроксимация временных рядов статистическими методами, б) построение и анализ динамической модели. Применяется распределенный подход: мир разбивается на регионы по географическому принципу. Для каждого региона строится макро модель, описывающая демографические и экономические процессы, происходящие внутри региона; взаимодействие регионов описывается моделью внешней торговли. При этом используется однопродуктовое приближение, экономические агрегаты измеряются в постоянных долларах 2015 г.

Принята схема разбивки на регионы, применяемая в Организации объединенных наций. Ниже приведены названия регионов для каждого континента с аббревиатурой в скобках.

– Африка: Северная Африка (NAFR), Восточная Африка (EAFR), Центральная Африка (MAFR), Южная Африка (SAFR), Западная Африка (WAFR).

– Америка: Северная Америка (NAMR), Карибские острова (CRBN), Центральная Америка (CAMR), Южная Америка (SAMR).

– Азия: Средняя Азия (CAS), Восточная Азия (EAS), Юго-Восточная Азия (SEAS), Южная Азия (SAS), Западная Азия (WAS).

– Европа: Восточная Европа (EEU), Северная Европа (NEU), Южная Европа (SEU), Западная Европа (WEU).

– Океания: Океания (OCN).

В региональных моделях в качестве основных переменных взяты следующие индикаторы:

- 1) численность населения N ;
- 2) основной капитал K ;
- 3) валовой внутренний продукт Y ;
- 4) валовое накопление (вложения в основные фонды) I ;
- 5) двусторонний торговый поток T .

Для расчета переменных составляются разностные уравнения регрессионного типа. Параметры регрессий оцениваются по известной в прошлом статистике, взятой из баз данных ООН [6,7,8].

В модели внешней торговли основными показателями являются двусторонние торговые потоки, вычисляемые на основе автономных региональных моделей. Таким образом основные переменные региональных моделей являются экзогенными величинами для торговой модели, что позволяет разделить модельные блоки и упростить расчеты.

Описание модели

Выпишем уравнения для автономной и торговой подмодели.

$$N(t) = N(t-1) \cdot (1 + d_0 - d_1 \cdot N(t-1)), \quad (1)$$

$$K(t) = I(t) + I(t-1) + I(t-2), \quad (2)$$

$$Y(t) = a_K \cdot K(t) + a_N \cdot N(t), \quad (3)$$

$$I(t) = c_Y \cdot Y(t-1) + c_K \cdot K(t-1). \quad (4)$$

Здесь d_0 , d_1 , a_K , a_N , c_Y , c_K – постоянные параметры. Как видно из уравнения (1), численность населения рассчитывается независимо от экономических переменных; сама же она влияет на остальные переменные посредством уравнения (3). То есть в модель заложена гипотеза об одностороннем влиянии демографии на экономику.

Внешняя торговля региона описывается двусторонними товарными потоками, каждый из которых в общем случае зависит от валовых региональных продуктов и времени:

$$T_{ij} = f(t, Y_i, Y_j), \quad (5)$$

где T_{ij} – товарный поток из региона i в регион j , Y_i , Y_j – валовые продукты регионов экспортера i и импортера j соответственно, t – время в годах: либо календарный год, либо номер года, начиная с определенного момента. Потоки считаются брутто-величинами, то есть внутренняя торговля региона ненулевая: $T_{ii} \neq 0$.

Рассматривалось 8 вариантов торгового уравнения (5):

$$T_{ij} = A + \alpha \cdot Y_i + \beta \cdot Y_j, \quad (5a)$$

$$\ln T_{ij} = \ln A + \alpha \cdot \ln Y_i + \beta \cdot \ln Y_j, \quad (5b)$$

$$\frac{T_{ij}}{Y_i} = \gamma + \delta \cdot Y_j, \quad (5c)$$

$$\ln \frac{T_{ij}}{Y_i} = \gamma + \delta \cdot \ln Y_j, \quad (5d)$$

$$\frac{T_{ij}}{Y_j} = \gamma + \delta \cdot Y_i, \quad (5e)$$

$$\ln \frac{T_{ij}}{Y_j} = \gamma + \delta \cdot \ln Y_i, \quad (5f)$$

$$T_{ij} = \eta + \theta \cdot t, \quad (5g)$$

$$\ln T_{ij} = \eta + \theta \cdot t. \quad (5h)$$

Уравнения (5a) и (5b) соответствуют множественной линейной и степенной зависимости (Multi-1 и Multi-2), уравнения (5c) и (5d) описывают линейную и степенную экспортную функцию (Export-1 и Export-2), (5e) и (5f) – линейную и степенную импортную функцию (Import-1 и Import-2). Ради порядка временные регрессионные модели (5g) и (5h), мы назовем «эталонными». Заметим, что для внутрирегионального потока T_{ii} экспортная и импортная функции совпадают.

Зная все потоки, можно рассчитать суммарный товарный экспорт T_{iW} и суммарный товарный импорт T_{Wi} i -го региона:

$$T_{iW} = \sum_j T_{ij}, \quad (6)$$

$$T_{Wi} = \sum_k T_{ki}. \quad (7)$$

Суммирование происходит по всем торговым партнерам, включая сам регион i . Полный региональный экспорт с учетом услуг X_i связан линейной зависимостью с суммарным товарным экспортом:

$$X_i = e_0 + e_1 \cdot T_{iW}. \quad (8)$$

Аналогично полный региональный импорт M_i определяется через суммарный товарный импорт:

$$M_i = m_0 + m_1 \cdot T_{Wi}. \quad (9)$$

В уравнениях (8), (9) коэффициенты e_0, e_1, m_0, m_1 – константы для каждого региона.

Проверка уравнений проводилась методом наименьших квадратов. Качество аппроксимации уравнений определяется по коэффициенту детерминации и значимости параметров регрессионных моделей. Верификация модели показала следующее.

1) Демография регионов Америки, Азии и Океании хорошо описывается уравнением (1) с 1970 по 2040 гг., для африканских регионов пришлось сдвинуть начало расчетов.

2) Для европейских регионов демографическое уравнение (1) не прошло проверку и подверглось модификации.

3) Уравнения (2)–(4) адекватно описывают региональную макроэкономику, за исключением ряда регионов, для Вост. Африки, Сред. Азии, Вост. Европы сделан сдвиг начала расчетов, для Юж. Америки проделана модификация уравнений.

4) Торговое уравнение (5) дало в целом удовлетворительную подгонку для монотонно меняющихся двусторонних потоков.

5) Наблюдается хорошая аппроксимация для суммарного товарного экспорта и импорта региона.

Помимо верификации также проводилось сравнение видов торгового уравнения по коэффициенту детерминации. Сравнение показало:

- нелинейные модели лучше подгоняют данные, чем аналогичные линейные модели;
- множественная модель лучше справляется с подгонкой данных, чем парные модели;
- в парных моделях (5c), (5d), (5e), (5f) случаев с близким к нулю R^2 больше, чем в эталонных регрессиях (5g) и (5h).

Расчеты

Графики приведены для отдельных расчетных величин и лишь при одном фиксированном наборе параметров. Ради экономии на одном рис. 4-5 расчетных кривых, относящихся преимущественно к одному континенту. Двусторонние товарные потоки рассчитаны по множественной нелинейной модели (5b).

На рис. 1-3 приведены графики глобальных величин: численности мирового населения, глобального продукта и валового накопления с 1970 по 2040 гг.

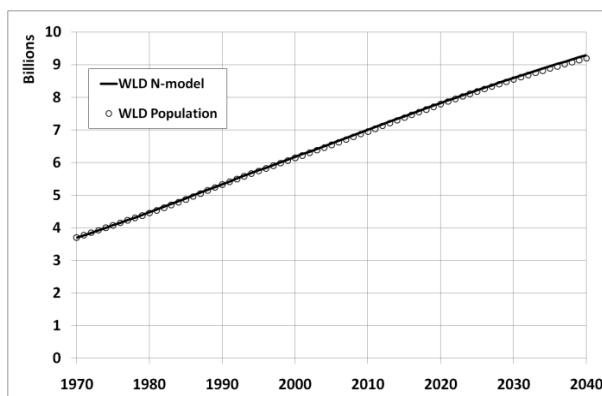


Рис. 1. Динамика мирового народонаселения в млрд. чел. Маркеры – исторические оценки с 1970 г. и прогноз ООН с 2020 г., сплошная линия – модельный расчет

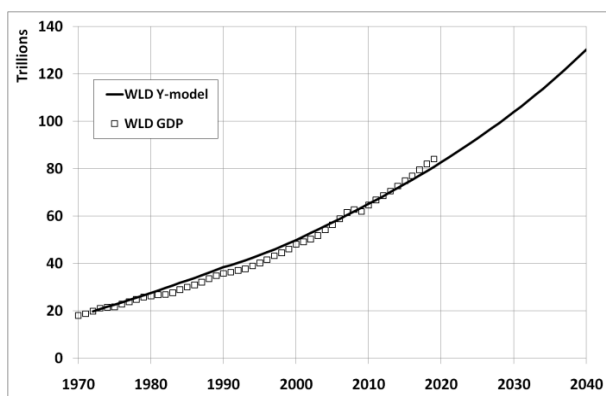


Рис. 2. Динамика валового мирового продукта в трлн \$ 2015 г. Маркеры – исторические оценки, сплошная линия – модельный расчет

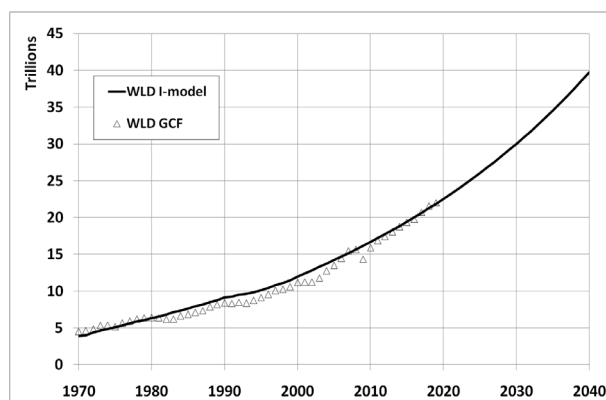


Рис. 3. Глобальное валовое накопление, в трлн \$ 2015 г.

Визуально между эмпирикой и расчетом неплохое соответствие, что для демографии неудивительно, учитывая результаты региональных моде-

лей, а для макроэкономики, видимо, сработал эффект «больших чисел». Основной вклад внесли регионы с большими значениями ВВП: Сев. Америка, Вост. Азия, Зап. Европа; к тому же при суммировании отклонения от расчетных линий частично компенсировались, что снизило относительный разброс.

Вычисления двусторонних торговых потоков по уравнению (5b) дали ожидаемые результаты: в тех случаях, где верификация была успешной, расчеты более или менее близки к статистике; там же, где в ходе проверки возникли трудности, численный эксперимент продемонстрировал несоответствие между моделью и данными.

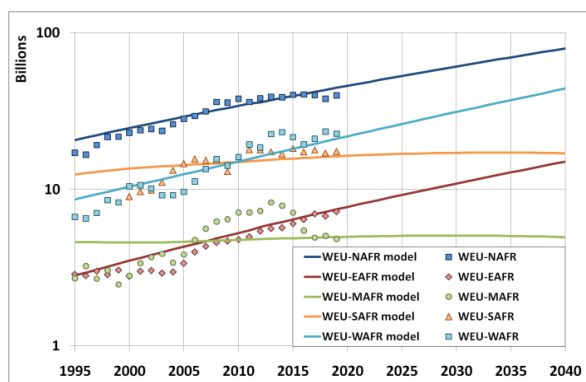


Рис. 4. Двусторонние товарные потоки из Зап. Европы в регионы Африки в \$ 2015 г. в логарифмическом масштабе

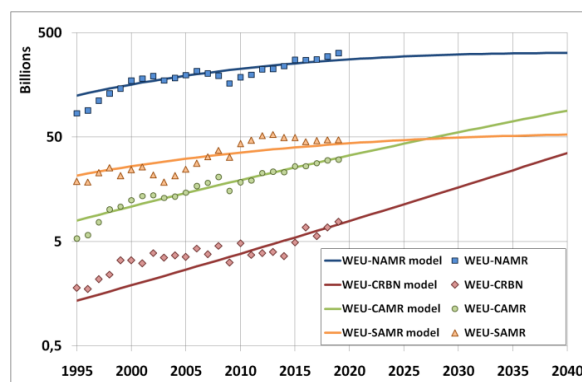


Рис. 5. Двусторонние товарные потоки из Зап. Европы в регионы Америки в \$ 2015 г. в логарифмическом масштабе

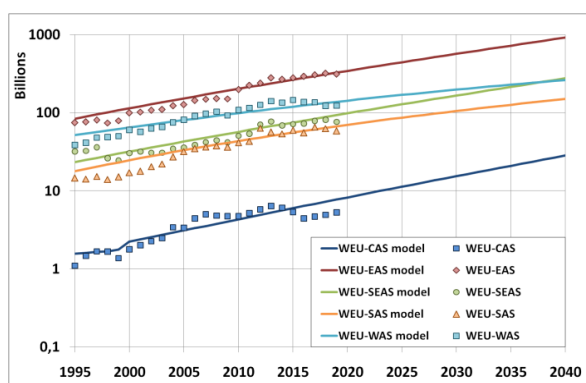


Рис. 6. Двусторонние товарные потоки из Зап. Европы в регионы Азии в \$ 2015 г. в логарифмическом масштабе

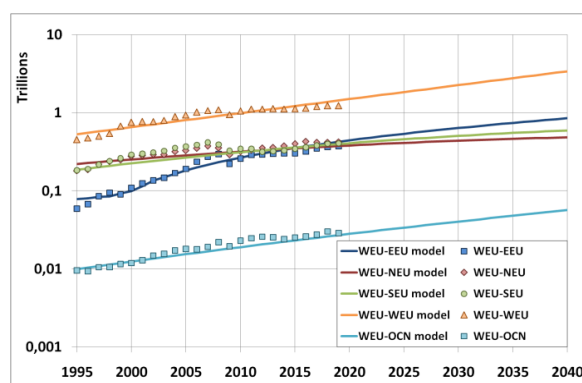


Рис. 7. Двусторонние товарные потоки из Зап. Европы в Европу и Океанию в \$ 2015 г. в логарифмическом масштабе

Лучше всего множественная лог-модель подошла для экспортных потоков десяти регионов: четырех европейских, четырех азиатских (за ис-

ключением Сред. Азии), Сев. Америки и Вост. Африки. В качестве образца на рис. 4–7 приведены все экспортные потоки Зап. Европы.

Региональный товарный экспорт-импорт позволяет оценить интегральную степень расхождения торговой модели с данными. Даже если отдельные двусторонние потоки плохо аппроксимированы, в силу пресловутого закона больших чисел их сумма может быть хорошо подогнана регрессией. На рис. 8 показана динамика суммарного товарного экспорта европейских регионов, на рис. 9 – их товарного импорта.

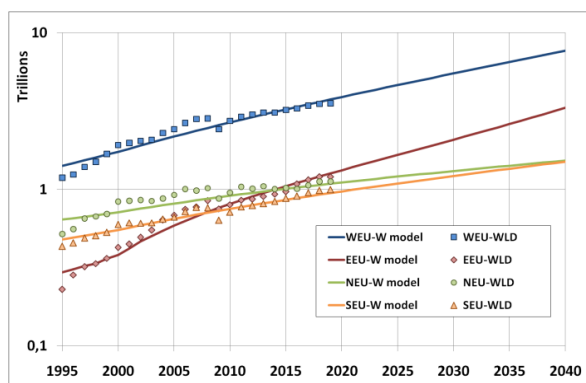


Рис. 8. Суммарный товарный экспорт регионов Европы в логарифмическом масштабе

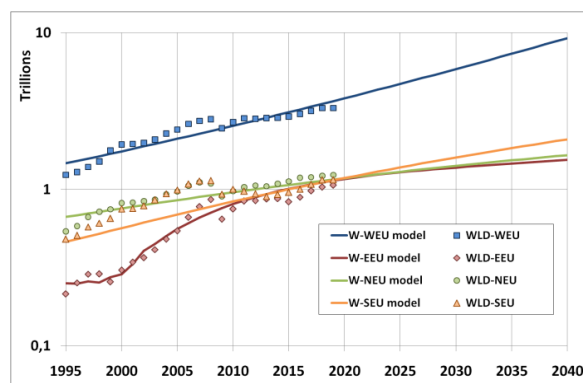


Рис. 9. Суммарный товарный импорт регионов Европы в логарифмическом масштабе

Общие выводы по разделу:

- За редким исключением демографические величины ведут себя непрерывно и монотонно, что идеально подходит для регрессионной модели.

- Наблюдается хорошее совпадение расчетных кривых с прогнозом ООН.

- Региональные ВВП в целом растут со временем, на тренд накладываются колебания.

- Макроэкономика региона хуже описывается предложенной моделью, что заметно в регионах Африканского континента. Наилучшее соответствие между моделью и эмпирическими данными наблюдается в регионах Европы и Океании.

- Более половины торговых потоков имеют временной тренд и хорошо аппроксимируются предложенными регрессионными моделями.

- Помимо возрастающего тренда можно выделить три типа динамики двусторонних потоков:

- 1) стационарный ряд – отсутствие линии тренда либо очень слабый тренд;

- 2) S-образная зависимость;

- 3) волновая (циклическая) динамика.

Заключение

Построена динамическая макро модель мировой динамики. В модели мир разбит на 19 географических зон – регионов, каждый регион представляет собой формальное объединение соседних государств. Внутреннее развитие регионов описывается уравнениями разностного типа для демографических и экономических индикаторов. Межрегиональные взаимодействия представляют собой торговые связи, подмодель торговли описывает перетекание валовой продукции от региона к региону. Проведенные расчеты показывают, что модель удовлетворительно описывает динамику монотонно меняющихся показателей. Наилучшее соответствие наблюдается у демографических показателей, наихудшее – у индикаторов внешней торговли. Расчеты показывают либо положительную динамику, либо выход индикаторов на постоянные значения к 2040 г.

Литература

1. *Махов С.А.* Динамическая модель внешней торговли стран БРИКС // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2016. №128.
2. *Махов С.А.* Динамическая модель стран БРИКС с учетом торговли // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2017. №139.
3. *Пирогов Г.Г., Богородицкий В.К., Бороздин И.И., Татарникова М.В., Федоровский Ю.П.* Моделирование международных внешнеэкономических связей в моделях глобального развития // Препринт ВНИИСИ. – М.: ВНИИСИ, 1980.
4. *Дубовский С. В.* Прогнозирование российского экономического роста и финансовой динамики в условиях глобализации и нестабильности // *Общественные науки и современность.* 2005, №3, с.129-136.
5. *Бокс Дж., Дженкинс Г.* Анализ временных рядов, прогноз и управление. – М.: Мир, 1974. Кн. 1.
6. *United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division* World Population Prospects 2019: Methodology of the United Nations Population Estimates and Projections (ST/ESA/SER.A/425). – New York: United Nations, 2019. https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Methodology.pdf
7. *United Nations Statistic Division.* National accounts main aggregates database. 2020. <https://unstats.un.org/unsd/snaama/Downloads>
8. UNCTADstat Data Center online. 2020. http://unctadstat.unctad.org/wds/ReportFolders/reportFolders.aspx?sCS_ChosenLang=en