

УДК: 330.4, 519.86, 51-77

Долгосрочная макро модель мировой динамики на основе эмпирических данных

С. А. Махов

Институт прикладной математики имени М. В. Келдыша РАН,
Россия, 125047, Москва А-47, Миусская пл., д. 4

E-mail: s_makhov@mail.ru

Получено 8 июля 2013 г.

В работе обсуждаются методические основы и проблемы моделирования мировой динамики. Излагаются подходы к построению новой имитационной модели глобального развития и первичные результаты моделирования. В основу построения модели положен эмпирический подход, основанный на анализе статистики основных социально-экономических показателей. На основании этого анализа выделены основные переменные. Для этих переменных составлены динамические уравнения (в непрерывно-дифференциальной форме). Связи между переменными подбирались исходя из динамики соответствующих показателей в прошлом и на основании экспертных оценок, при этом использовались эконометрические методы, основанные на регрессионном анализе. Были проведены расчеты по полученной системе динамических уравнений, результаты представлены в виде пучка траекторий для тех показателей, которые непосредственно наблюдаемы и по которым имеется статистика. Таким образом, имеется возможность оценить разброс траекторий и понять прогнозные возможности представленной модели.

Ключевые слова: мировая динамика, регрессионный анализ, дифференциальные уравнения

The long-term empirical macro model of world dynamics

S. A. Makhov

Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Science, 4 Miusskaya sq., Moscow A-47, 125047, Russia

Abstract. — The work discusses the methodological basis and problems of modeling of world dynamics. Outlines approaches to the construction of a new simulation model of global development and the results of the simulation. The basis of the model building is laid empirical approach which based on the statistical analysis of the main socio-economic indicators. On the basis of this analysis identified the main variables. Dynamic equations (in continuous differential form) were written for these variables. Dependencies between variables were selected based on the dynamics of indicators in the past and on the basis of expert assessments, while econometric techniques were used, based on regression analysis. Calculations have been performed for the resulting dynamic equations system, the results are presented in the form of a trajectories beam for those indicators that are directly observable, and for which statistics are available. Thus, it is possible to assess the scatter of the trajectories and understand the predictive capability of this model.

Keywords: world dynamics, regression analysis, differential equations

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2013, vol. 5, no. 5, pp. 883–891 (Russian).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 11-06-00471-а) и РГНФ (проект 12-03-00387).

© 2013 Сергей Анатольевич Махов

Подход к моделированию

Первые количественные модели мировой динамики были созданы в начале 70-х годов прошлого века Дж. Форрестером [Форрестер, 1978] и Д. Медоузом [Пределы роста, 1992]. Поэтому 1970–1972 годы фактически могут считаться началом отсчета глобального моделирования — нового направления математического моделирования в решении самых насущных задач, связанных с анализом и прогнозом поведения мировой системы.

Обращение к моделям Дж. Форрестера и Д. Медоуза не случайно, несмотря на звучавшую в свое время критику этих моделей как неточных и несостоятельных. Хотя прошло уже почти 40 лет, общие тенденции мирового развития за эти годы изменились не слишком сильно; поэтому пока что развитие происходит согласно сценарию указанных моделей [Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л., Рандерс, 2007]. Также не утратила своей ценности методика моделирования на основе системной динамики.

Острота кризиса, развернувшегося в 2009 году, заставляет пристальнее взглянуть на протекающие общемировые процессы, чтобы понять, насколько локализован по времени текущий кризис и не является ли он предвестником более масштабных потрясений в будущем. Поэтому долгосрочный прогноз глобального развития по меньшей мере до 2030–50 года весьма актуален [Hawksworth, 2006].

Особенно важен такой прогноз для России, живущей в условиях зависимости от мировой конъюнктуры, но все еще сохраняющей некоторые возможности влияния на мировую экономику. Это позволило бы очертить рамки возможного и невозможного, чтобы выстраивать стратегию собственного развития.

Все эти соображения говорят о необходимости создания новой глобальной трендовой модели, по возможности такой же простой, как модель Дж. Форрестера (или даже еще проще), основанной на новых статистических данных. Такая модель должна отражать тенденции в динамике основных мировых процессов.

На рисунках 1–3 представлены основные характеристики мировой динамики: численность населения, валовой мировой продукт (ВМП) и душевой ВМП на протяжении последних 40 лет.

Как видно из графиков, все три величины растут со временем довольно уверенно: численность населения более гладко и монотонно, ВМП и душевой ВМП с колебаниями. В целом это означает, что и мировая демография, и мировая экономика имеют вполне определенные тренды, и их моделирование имеет смысл.

В предлагаемой здесь модели в качестве основных переменных взяты *численность населения N , наличные запасы энергоресурсов R , основной капитал K , уровень технологий T и уровень образования E* . В отличие от моделей Дж. Форрестера и Д. Медоуза, не выделяются загрязнения и фонды в сельском хозяйстве, но зато вводятся технологии и образование.

На необходимость учета технологий как важнейшего фактора глобального развития указывалось еще в 70-е годы XX века при появлении первых моделей мировой динамики. Образование как фактор выдвинулось в последние десятилетия и, по всей видимости, будет играть в будущем одну из ключевых ролей, поэтому его учет представляется необходимым.

Сельское хозяйство не рассматривается отдельно, поскольку принято допущение, что на современном уровне развития технологий производство продовольствия определяется преимущественно энергоресурсами и капиталом, а потому не является самостоятельным фактором.

По схожей причине не выделяются загрязнения: во-первых, не до конца изучен вопрос их влияния на окружающую среду, во-вторых, загрязнения могут рассматриваться как фактор, снижающий общую эффективность использования территории и ресурсов (в том и числе и потому, что на преодоление такого снижения требуются капитал и энергия). В связи с этим очистка загрязнений, восстановление ресурсов, а также ресурсосбережение могут рассматриваться в одном контексте как единый процесс.

Для перечисленных выше пяти переменных составляются динамические уравнения. Связи между переменными подбираются, исходя из динамики соответствующих показателей в про-

шлом и на основании экспертных оценок. Таким образом, используются эконометрические методы, основанные на регрессионном анализе. Опишем, как это работает, в приложении к каждому сектору более подробно.

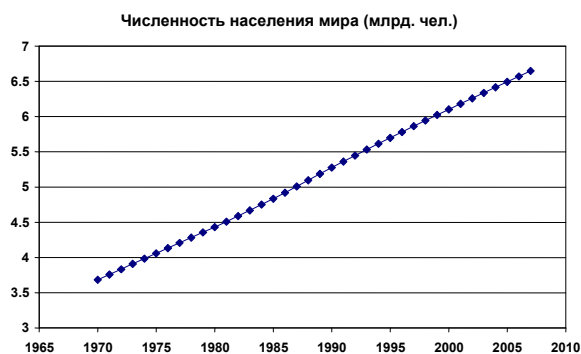


Рис. 1. Численность населения мира в 1970–2007 годы. Источник: [UN Databases]

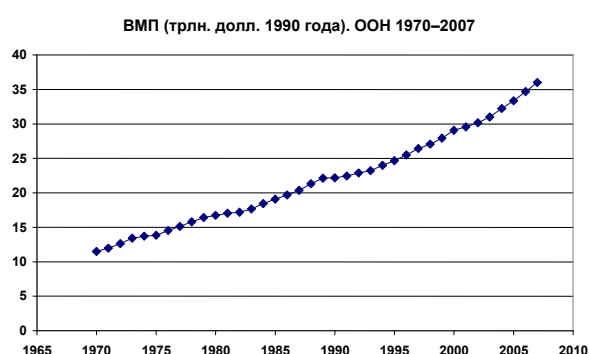


Рис. 2. Валовой мировой продукт за 1970–2007 годы. Источник: [UN]



Рис. 3. ВМП на душу населения за 1970–2007 годы. Источник: [UN]

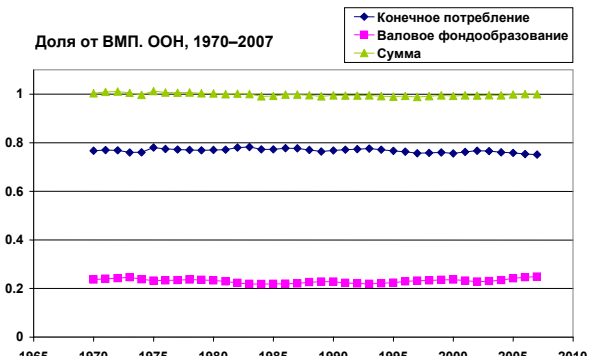


Рис. 4. Доли конечного потребления и валового фондообразования от ВМП, и их сумма. Источник: [UN]

Уравнения для секторов модели

Сектор демографии. В основу демографического уравнения положено квазилогистическое уравнение

$$\frac{dN}{dt} = c_N N \left(1 - \frac{M}{M_{\max}} \right), \tag{1}$$

где M — уровень жизни (конечное потребление на душу населения), c_N , M_{\max} — параметры (константы). Иначе говоря, данное уравнение отслеживает ресурсное ограничение по душевому конечному потреблению. Разберемся с последним.

На рисунке 4 представлены конечное потребление и валовое накопление (фондообразование) в долях от ВМП, также показана их сумма. Как видно, на протяжении последних 40 лет сами доли менялись слабо, при этом долевая сумма практически равна 1, незначительно от нее отклоняясь. Это дает основание записать следующее:

$$C = g_C Y, \tag{2}$$

$$I = g_K Y, \tag{3}$$

$$g_C + g_K = 1. \tag{4}$$

Здесь Y — продукт (ВМП), C — конечное потребление, I — валовое накопление, g_C — доля ВМП, идущая на конечное потребление, g_K — доля ВМП, идущая в основной капитал, $g_C = 0.768 \pm 0.008$, $g_K = 0.231 \pm 0.008$ (в качестве оценок взяты средние значения, в качестве диапазона разброса — стандартная ошибка). Соотношение (2) показывает, что материальный уровень жизни M прямо пропорционален ВМП Y , поскольку

$$M = \frac{C}{N}. \quad (5)$$

Теперь определим параметры c_N , M_{\max} , построив соответствующую зависимость темпа прироста численности $\frac{1}{N} \frac{dN}{dt}$ от подушевого потребления M . На основании построенной линейной регрессии можно записать: $c_N = 0.034 \pm 0.002$ (1/год), $M_{\max} = 5900 \pm 300$ (постоянных долларов 1990 года).

Сектор ресурсов. Под ресурсами будут пониматься прежде всего невозобновляемые топливно-энергетические ресурсы (ТЭР). Под величиной R разумеются разведанные запасы ТЭР (т. е. доказанные и пригодные к добыче). Мы предполагаем, что описать движение физических потоков в целом, то есть добычу и потребление основных энергоресурсов, возможно без прогноза цен на ресурсы [Орлов, 2009].

Исходя из сказанного, будем иметь в виду следующее уравнение:

$$\frac{dR}{dt} = -R_D + R_p, \quad (6)$$

где R_D — добыча, R_p — пополнение запасов, разведка. Чтобы уточнить, рассмотрим динамику запасов отдельных видов энергоресурсов — нефти и газа.

На рисунке 5 показана динамика совместных запасов нефти и газа, приведенных к тоннам нефтяного эквивалента (тнэ). Как видно, запасы со временем растут практически линейно. Косвенно это указывает на отсутствие ярко выраженного тренда для изменения запасов (т. е. производной) и также разведки ресурсов.

Это дает основания считать разведку энергоресурсов примерно постоянной во времени: $R_p = 10.842 \pm 0.914$ (млрд. тнэ/год) или $R_p = 433.68 \pm 36.56$ (квадриллионов британских тепловых единиц¹) для нефти и газа суммарно.

Теперь посмотрим на добычу энергоресурсов или, иначе, производство первичных источников энергии. Как известно, основную долю (от 85 до 92 %) в производстве энергии составляют топливные энергоресурсы: уголь, нефть, газ. Поэтому проведенное выше исследование запасов данных ресурсов вполне оправдано.

Далее необходимо понять, с чем может быть связана добыча энергоресурсов. Будем предполагать связь с экономическими показателями, а точнее с ВМП:

$$R_D = k_R Y, \quad (7)$$

где k_R — энергоемкость ВМП, т. е. отношение использованной (или произведенной, что почти одно и то же) энергии к ВМП.

На рисунке 6 показана зависимость данного показателя от времени. Как видно, в течение 35 лет с 1970 по 2005 годы энергоемкость падала практически по линейному закону (до того она в течение 10–15 лет оставалась постоянной). Конечно, нельзя быть полностью уверенным в том, что данный закон останется в силе в ближайшие 30–40 лет. Однако можно дать оценку

¹ 1 тнэ = 40 млн бте = 42 ГДж.

изменения данной величины, если допустить, что снижаться быстрее, чем указанный на графике линейный тренд, она не будет.

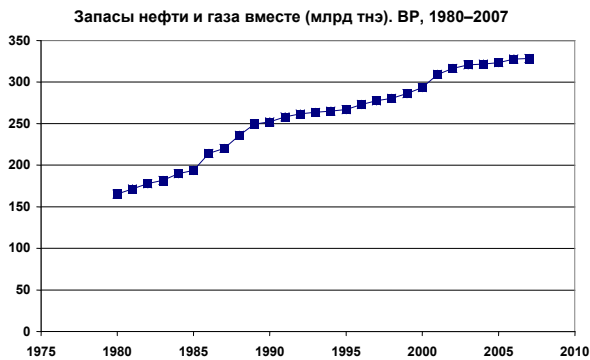


Рис. 5. Динамика совместных запасов нефти и газа за 1980–2007 годы в тоннах нефтяного эквивалента. Источник: [British Petroleum]

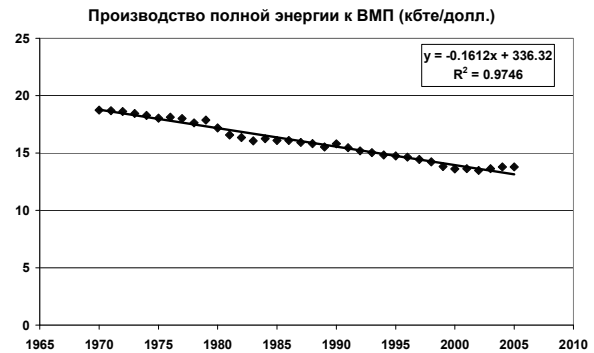


Рис. 6. Энергоёмкость ВМП за 1970–2005 годы (тыс. бте / постоян. долл. 1990 года). Источники: [UN, EIA]

Исходя из всего сказанного, получаем:

$$k_R = k_0 - k_1(t - t_0), \tag{8}$$

$k_0 = 18.779 \pm 0.091$ (кбте/дол.) или 0.4648 ± 0.0022 (тнэ/дол.), $k_1 = 0.1612 \pm 0.0045$ (кбте/дол. год) или 0.0040 ± 0.0001 (тнэ/(дол. год)), $t_0 = 1970$.

Коэффициент энергоёмкости k_R используется в качестве *управляющего параметра*: задавая его поведение как функцию времени, получаем сценарий эволюции ресурсного сектора мировой системы.

Сектор капитала. Уравнение для основного капитала предполагается вполне обычным:

$$\frac{dK}{dt} = I - \mu K, \tag{9}$$

где I — валовое накопление, μ — коэффициент выбытия основных фондов. Как уже выяснено выше, $I = g_K Y$, разберемся с μ .

По статистическим данным была построена зависимость износа μK от интеграла чистого валового накопления на промежутке 1970–2006 годы, т. е. разницы между капиталом $K(t)$ и начальным значением $K(1970) = K_0$ (рис. 7). Выяснилось, что зависимость можно считать практически линейной с небольшими колебаниями. На основании регрессии получено: $\mu = 0.041 \pm 0.001$ (1/год), $K_0 = 30.0 \pm 0.6$ (трлн постоянных долларов 1990 года). То есть среднее время износа основных фондов в целом по миру составляет около 24.3 ± 0.3 лет.

Сектор технологий. Технологии — величина, достаточно плохо измеримая. По смыслу — это все, что повышает эффективность использования наличных ресурсов. В приложении к экономике важны технологии, увеличивающие продукт и приносящие прибыль. Иными словами, те технологии, которые повышают производительность труда и качество используемого капитала при создании нового продукта (т. е. капиталоотдачу). Одним из способов учесть это является написание уравнения, связывающего ВМП, капитал, численность населения и технологии, т. е. некоего аналога производственной функции. Будем использовать следующий вид:

$$Y = TK^a N^{1-a}. \tag{10}$$

Здесь T — уровень технологий, уравнение для которого еще предстоит выяснить. Иными словами, ВМП задается функцией Кобба–Дугласа при техническом прогрессе, нейтральном по

Хиксу. Уравнение (10) является, таким образом, *определением* для уровня технологий T , к тому же зависящим от параметра a , следовательно, параметр a не может быть получен на основании регрессии $Y = f(T, K, N)$, а должен быть задан из теоретических соображений. В макроэкономической теории зачастую предполагается, что параметры a и g_K равны, что выражает собой так называемое золотое правило накопления. Данное условие означает, что имеет место стационарный экономический рост с наибольшим темпом, т. е. мировая экономическая система развивается наилучшим способом [Столерю, 1974].

Исходя из сказанного, мы примем параметр $a = 0.23 \pm 0.04$, т. е. меняющимся в диапазоне от 0.19 до 0.27. Динамика уровня технологий в этом случае показана на рис. 8. Заметим, что в работах [Hawksworth, 2006, Махов, 2010] принято $a = 0.33$.

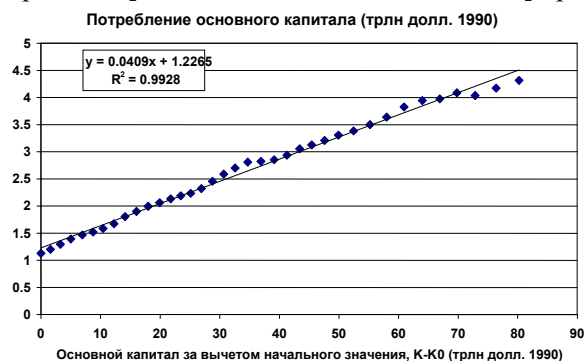


Рис. 7. Потребление основного капитала в зависимости от суммарных валовых накоплений в капитале (интеграл валового накопления) за 1970–2006 годы. Источник: [UN, World Bank]

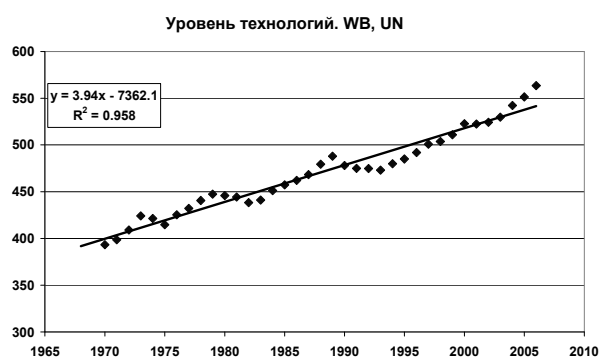


Рис. 8. Уровень технологий по миру в целом за 1970–2006 годы (долл. 1990 года). В уравнении (10) принято $a = 0.23$. Источники: [UN, World Bank]

Как видно, технологии растут скорее линейно по времени, чем экспоненциально, что несколько противоречит представлениям об экзогенном техническом прогрессе, согласно которым технический прогресс развивается с постоянным темпом. Уравнение для технологий будет уточнено в следующем секторе, поскольку предполагается его связь с образованием.

Сектор образования. В качестве характерной величины была выбрана ожидаемая продолжительность времени обучения E , выражаемая в годах. То есть предполагается, что чем дольше человек учится, тем выше уровень его образования. Мы прекрасно понимаем всю условность подобного предположения, однако, во-первых, в какой-то степени это, в самом деле, верно, а, во-вторых, той же степенью условности обладает большинство показателей, фигурирующих в статистике.

Рассматривалось средневзвешенное значение, которое по смыслу лучше подходит в качестве характеристики мира в целом. За вес принята численность населения страны по отношению к общемировой численности населения (рис. 9), т. е., в некотором смысле, вес показывает вероятность для взятого наугад человека оказаться жителем данной страны и, соответственно, иметь уровень образования, средний для этой страны.

Имеющиеся данные указывают на линейный со временем рост ожидаемой продолжительности времени обучения. Исходя из гипотетической связи между технологиями и образованием, напишем динамическое уравнение для уровня технологий. Рост продолжительности времени обучения приводит к повышению уровня образования, оно, в свою очередь, приводит к росту качества рабочей силы, что косвенно влияет на развитие технологий.

Таким образом, зависимость уровня технологий T от ожидаемой продолжительности времени обучения E можно считать линейной с некоторыми колебаниями, которые вызваны, судя по всему, запаздыванием. Следовательно, можно написать уравнение с запаздыванием:

$$\frac{dT}{dt} = \lambda(p + qE - T), \quad (11)$$

где λ — коэффициент старения технологий, обратный характерному времени запаздывания, которое принимается 10 ± 5 лет, $\lambda = 0.20 \pm 0.10$, $p = 62.3 \pm 15.2$, $q = 41.35 \pm 2.06$.

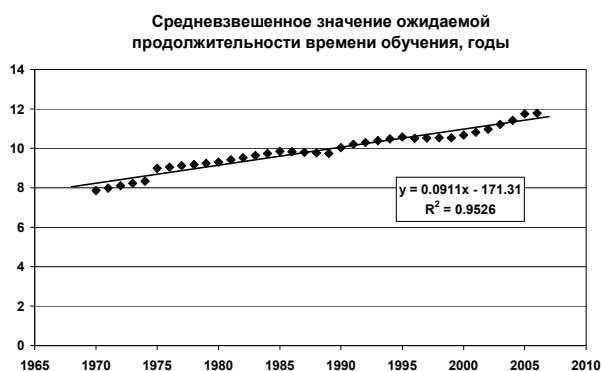


Рис. 9. Средневзвешенная по миру ожидаемая продолжительность времени обучения за 1970–2006, построенная с интерполяцией. В качестве весов взяты доли стран в мировой численности населения. Источники: [UNESCO, UN]

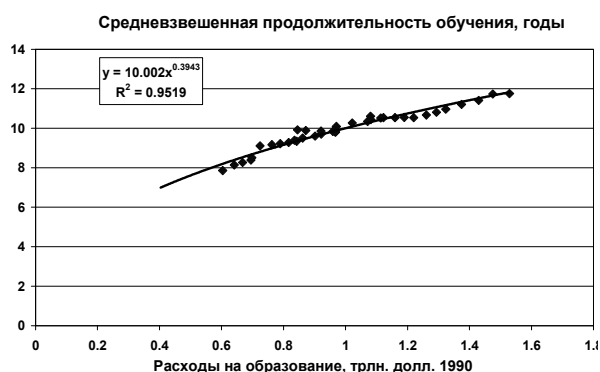


Рис. 10. Средневзвешенная ожидаемая продолжительность времени обучения в зависимости от общемировых расходов на образование (трлн. долл. 1990). Источники: [UNESCO, UN, World Bank]

Теперь свяжем продолжительность обучения с расходами на образование. На рисунке 10 изображена зависимость средневзвешенной продолжительности обучения от расходов на образование в целом по миру. Как видно, зависимость носит достаточно монотонный характер и может быть приближена подходящей гладкой кривой. Выбрана степенная функция, так как по сравнению с линейной и логарифмической функциями у нее выше коэффициент детерминации R^2 и она лучше подходит по смыслу.

$$\frac{dE}{dt} = \nu (c_E (g_E Y)^d - E). \tag{12}$$

Здесь ν — коэффициент, обратный характерному времени запаздывания, g_E — доля ВМП, идущая в образование, c_E , d — коэффициенты; $\nu = 0.2 \pm 0.1$, $g_E = 0.045 \pm 0.01$, $c_E = 10.0 \pm 0.1$, $d = 0.394 \pm 0.015$.

Расчеты по модели

По приведенной системе уравнений (1), (6), (9), (11), (12) были проведены первичные расчеты для разных значений параметров и начальных данных. Технически дифференциальные уравнения решались методом Эйлера с шагом в 1 год, то есть, по сути, заменялись разностными аналогами. Это оправдано, так как модель довольно грубая, а точность данных также невысока.

На рисунках 11–18 представлены результаты расчетов для тех переменных, которые непосредственно наблюдаемы и по которым имеется статистика. При этом квадратиками обозначены исторические данные, сплошными линиями — расчетные траектории при разных параметрах. Основная цель данных рисунков: показать разброс траекторий по каждому показателю.

Проведенные расчеты показывают удовлетворительное соответствие между моделью и статистическими данными, известными из прошлого. Для того чтобы оценить точность прогноза, следует провести полное параметрическое исследование модели и определить разброс по траекториям основных динамических переменных.

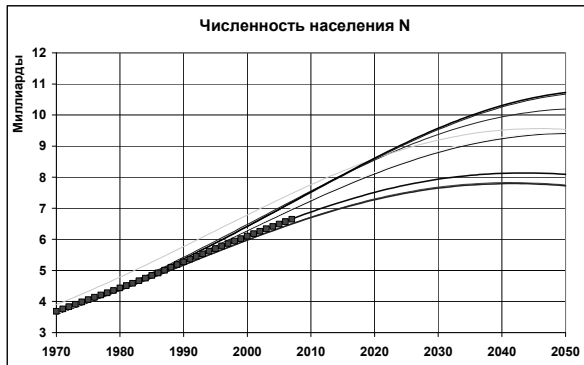


Рис. 11. Численность населения в 1970–2050 годах. Разброс в 2050 году составляет от 7.6 до 10.6 млрд чел

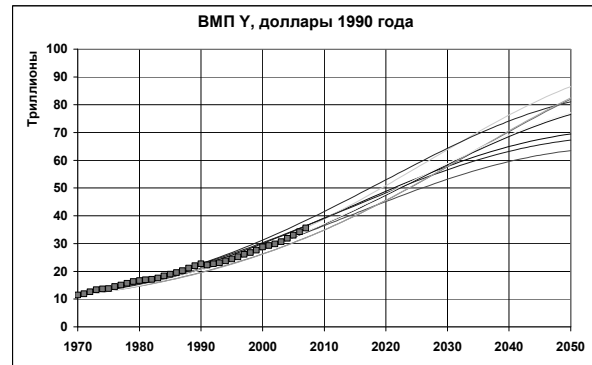


Рис. 12. ВВП в 1970–2050. Разброс в 2050 году составляет от 63 до 86 трлн долл

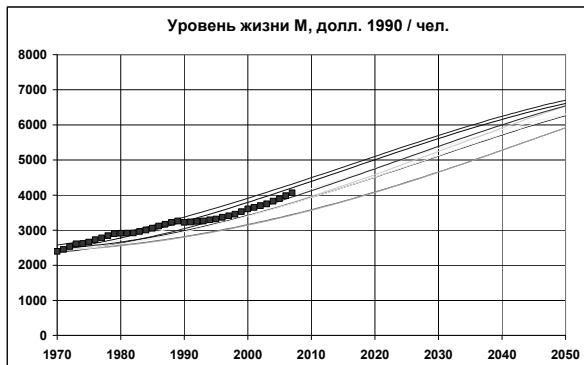


Рис. 13. Конечное потребление на душу населения. Как видно, расчетные линии дают заниженное значение по сравнению с известными данными. Относительный разброс в 2050 году меньше, чем у ВВП

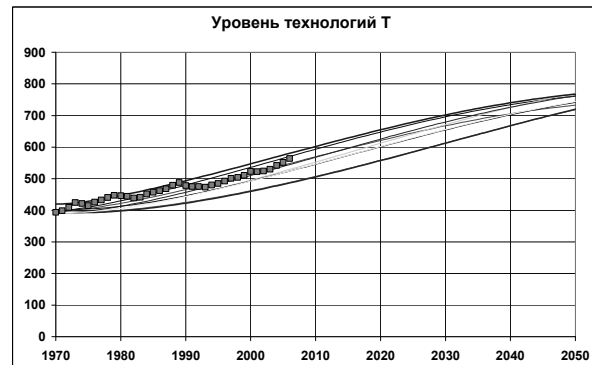


Рис. 14. Уровень технологий. Расчетные траектории дают заниженное значение по сравнению с историческими данными. Разброс значений в 2050 году относительно невелик

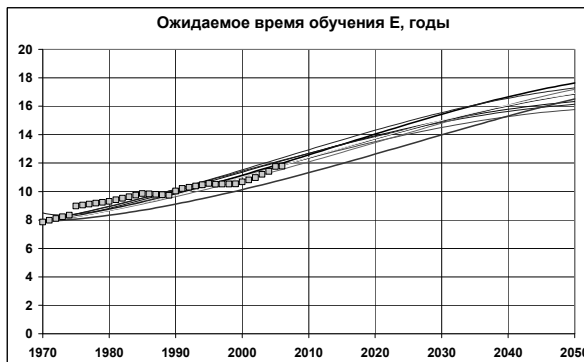


Рис. 15. Ожидаемая продолжительность обучения. Расчетные значения несколько завышены по отношению к реальным данным. Разброс в 2050 году от 16 до 17.7 лет

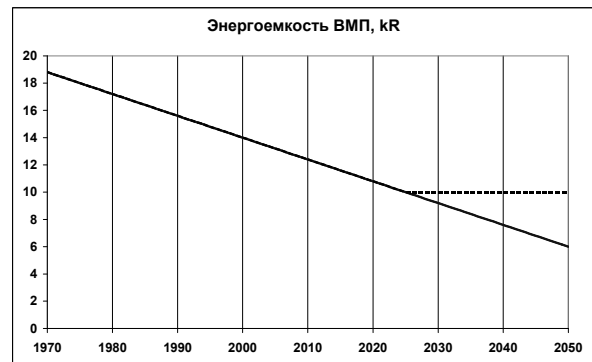


Рис. 16. Энергоемкость валового мирового продукта (кбте / постоян. долл. 1990 года). Для одной траектории (обозначена пунктиром) принято допущение о стабилизации энергоемкости на уровне 10, начиная с 2025 года, для остальных траекторий энергоемкость убывает линейно со временем

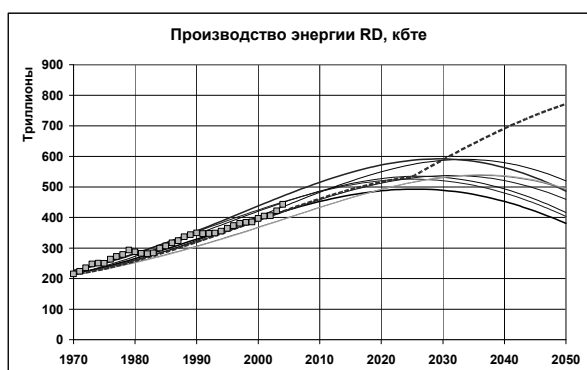


Рис. 17. Производство энергии (добыча ресурсов). Расчетные линии несколько завышены по отношению к данным. Общий характер линий (возрастание, потом убывание) вызван предположением относительно поведения энергоемкости: считается, что она убывает по линейному закону (9). Для одной расчетной траектории (она обозначена пунктирной линией на графике) это не выполнено: предположено, что энергоемкость с 2025 году не меняется и производство энергии стало быстро расти

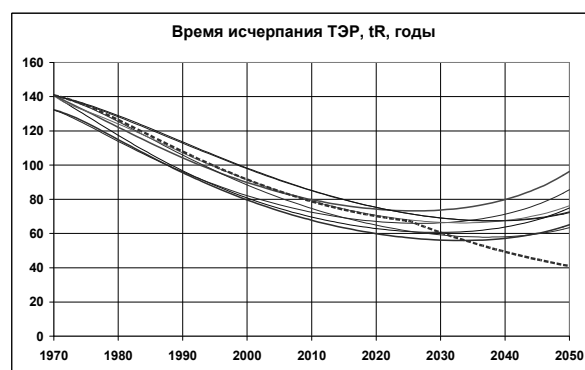


Рис. 18. Характерное время истощения энергоресурсов — отношение запасов к добыче. Картина обратная той, что представлена на предыдущем рисунке

Список литературы

- Махов С. А. Долгосрочные тенденции и прогнозы с позиций новой модели мировой динамики // Прогноз и моделирование кризисов и мировой динамики. — М.: ЛКИ, 2010. — С. 262–276.
- Медоуз Д. Х., Медоуз Д. Л., Рандерс Й., Беренс Ш. Пределы роста. — М.: МГУ, 1992.
- Медоуз Д. Х., Медоуз Д. Л., Рандерс Й. Пределы роста. 30 лет спустя — М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.
- Орлов Ю. Н. Некоторые аспекты прогнозирования мировых энергетических рынков // Проблемы математической истории: историческая реконструкция, прогнозирование, методология / Отв. ред. Г. Г. Малинецкий, А. В. Коротаев. — М.: Книжный дом «Либроком», 2009. — С. 90–103.
- Столерю Л. Равновесие и экономический рост (принципы макроэкономического анализа). — М.: «Статистика», 1974. — 472 с.
- Форрестер Дж. Мировая динамика. — М.: Наука, 1978.
- British Petroleum. URL: <http://www.bp.com/sectiongenericarticle800.do?categoryId=9037130&contentId=7068669>.
- Hawksworth J. The World in 2050: How big will the major emerging economies get and how can the OECD compete? // PricewaterhouseCoopers LLP, March 2006. URL: <http://www.pwc.com/gx/en/world-2050/pdf/world2050emergingeconomies.pdf>.
- UN Databases. URL: <http://unstats.un.org/unsd/snaama/dnlList.asp>.
- Unesco. URL: <http://stats.uis.unesco.org/unesco/ReportFolders/ReportFolders.aspx>.
- US Energy Information Administration. URL: <http://www.eia.gov/countries/>.
- World Bank. URL: www.worldbank.org.