

Б. В. Дигас, В. Л. Розенберг

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНОЧНАЯ МОДЕЛЬ MERGE: АДАПТАЦИЯ К ТЕКУЩЕМУ СОСТОЯНИЮ МИРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

*Одним из активно используемых инструментов для изучения проблемы изменения климата является оптимизационная междисциплинарная модель MERGE, предназначенная главным образом для количественного оценивания результатов применения различных природоохранных стратегий. Компонентами модели являются экономико-энергетический модуль, климатический модуль и модуль оценки ущерба. Основное внимание в работе уделяется адаптации модели MERGE к современному состоянию мировой экономики, а также анализу возможных траекторий экономического развития России и изучению последствий участия страны в инициативах по снижению выбросов парниковых газов при различных предположениях на динамику региональных экономико-энергетических показателей. В качестве источника модельных сценариев развития российской экономики используется прогноз долгосрочного социально-экономического развития страны на период до 2030 года, выполненный Минэкономразвития РФ (а именно, рассматриваются консервативный, инновационный и форсированный сценарии, специфика которых определяется разными моделями государственной политики обеспечения макроэкономической сбалансированности). Дополнительно привлекается базовый вариант входных данных MERGE, сформированный на основе оценок западных экспертов.*

**Ключевые слова:** комплексные оценочные модели, межвременная оптимизация, сценарии экономического развития, эмиссии парниковых газов

## 1. Введение: назначение и структура модели MERGE

Задача прогнозирования климатических изменений и смягчения их последствий является одной из наиболее актуальных проблем, стоящих перед современным миром. При отсутствии общепринятой точки зрения на природу движущих сил динамики климата и на возможность управления ею многие эксперты сходятся во мнении, что наблюдающиеся в последнее столетие резкие изменения климата в определенной степени объясняются увеличением концентрации в атмосфере парниковых газов по причине антропогенного воздействия, которое проявляется, прежде всего, в значительном увеличении потребления ископаемого топлива. Для изучения различных аспектов проблемы изменения климата привлекаются так называемые комплексные оценочные модели, имеющие, как правило, междисциплинарный характер. Их основной функцией является построение множества возможных сценариев развития социально-экономических систем (как глобальной, так и региональных) с последующим выбором оптимальной траектории на основании определенных критериев качества. Поэтому такие модели могут использоваться компетентными органами, принимающими решения как инструмент оценивания той или иной стратегии экономического развития. Во время дискуссий о целесообразности участия России в международных инициативах по сокращению выбросов парниковых газов [3] хорошо зарекомендовала себя модель MERGE, разработанная американскими учеными [12, 13] и модифицированная в Международном институте прикладного системного анализа (Лаксенбург, Австрия) и Институте математики и механики УрО РАН (Екатеринбург, Россия) [7, 9, 11]. Эта модель позволяет формализовать и количественно оценить результаты применения различных стратегий сокращения выбросов парниковых газов и стратегий внедрения новых энергетических технологий. Она состоит из трех связанных между собой модулей (экономико-энергетического, климатического и оценки ущерба) и включает в себя около 20 тысяч уравнений и неравенств и около 30 тысяч скалярных переменных.

Экономико-энергетический модуль, являющийся ядром модели MERGE, предназначен для моделирования на достаточно большом временном интервале динамики социально-экономических систем (в частности, ВВП, развития производственного и энергетического секторов, импорта и экспорта энергоносителей,

выбросов парниковых газов). Его специфика состоит в формализации и количественной оценке затрат (в форме потери ВВП) на выполнение различных природоохранных мер на региональном и глобальном уровнях. Во всех версиях этого модуля мир делится на регионы, каждый из которых рассматривается как независимая действующая сила (единый производитель-потребитель) и подчиняется финансовым ограничениям. Модуль представляет собой полностью интегрированную прикладную модель общего равновесия. В каждый момент времени спрос и предложение уравниваются посредством выбора цен на товары, задействованные в международной торговле, а именно — цен на нефть, газ, уголь, потребительские товары и квоты на эмиссию парниковых газов. Данный модуль является не набором рекурсивных процедур, которые определяют состояние системы по ее предыстории, а оптимизатором, находящим оптимальные траектории экономико-энергетического развития регионов из условия максимума суммы (по всему интервалу времени) дисконтированных полезностей регионального потребления, то есть так называемого благосостояния Негиши. Оптимизационная задача представляет собой задачу нелинейного программирования, для решения которой используется метод последовательной совместной максимизации, обеспечивающий сходимость к одному из равновесных состояний системы на всем временном интервале. Входными параметрами экономико-энергетического модуля являются население, его динамика, прогноз роста ВВП на душу населения, макроэкономические параметры, энергетические характеристики (в частности, углеродные показатели энергопотребления, определяющие выбросы для различных технологий). Выходными параметрами модуля являются оптимальная динамика экономического развития региона, в частности реализовавшийся ВВП и его характеристики (карбоноёмкость, структура — потребление, инвестиции, экспорт и импорт), энергетические выбросы парниковых газов (определяются величиной ВВП, его энергоёмкостью и углеродными показателями энергопотребления), гипотетические затраты на снижение выбросов в соответствии с внешними ограничениями (например, согласно инициативам типа Киотского протокола).

Климатический модуль учитывает наиболее важные антропогенные парниковые газы и рассчитывает их концентрации в атмосфере и океане по эмиссиям и доинду-

стриальному уровню. Концентрации используются для определения фактического изменения температуры, которое подается на вход модуля оценки ущерба, анализирующего два типа последствий изменения климата, именно рыночные и нерыночные (экологические) потери. Рыночный ущерб включает те категории, которые входят в национальный доход, измеряемый обычным способом, и могут быть оценены с помощью цен и функций спроса и предложения. Фактически ущерб этого типа трактуется как доля ВВП, которая теряется вследствие климатических изменений, обусловленных увеличением температуры. Многие эксперты полагают, что в различных экономических выкладках следует пользоваться именно так называемым «зеленым ВВП», учитывающим указанные потери и изменение экологических ресурсов в целом [1]. Нерыночные эффекты не связаны с ценами и должны оцениваться другими методами (в том числе посредством анализа предпочтений будущих поколений).

Новизна данного исследования состоит в адаптации модели MERGE к современному состоянию мировой экономики и в проведении сравнительного анализа на примере России, расчетов согласно различным сценариям динамики региональных экономико-энергетических показателей.

В следующем разделе кратко описывается основная вычислительная процедура модели с указанием параметров, как правило, варьируемых при организации вычислительных экспериментов.

## 2. Экономико-энергетический модуль модели MERGE

Как сказано выше, экономико-энергетический модуль является оптимизатором, находящим искомые траектории регионального развития из условия максимума суммы (по всему интервалу времени) дисконтированных полезностей потребления. Рассматриваемый временной промежуток разбивается на  $n$  интервалов точками  $t_0 < t_1 < \dots < t_n$ ; длину шага дискретизации (в годах) обозначим через  $\delta_i = t_i - t_{i-1}$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Суть межвременной оптимизации состоит в построении последовательности (в соответствии с дискретизацией) уровней регионального потребления, максимизирующей общую сумму дисконтированных полезностей потребления. Другими словами, в MERGE предполагается, что решения относительно возможных стратегий экономического развития в каждом регионе принимаются та-

ким образом, чтобы максимизировать суммарное благосостояние Негиши:

$$\begin{aligned} TotalWealth &= \sum_r nw_r W_r = \\ &= \sum_r nw_r \sum_{i=1}^n \delta_i udf_i \log C_i \rightarrow \max. \end{aligned}$$

Здесь используются следующие обозначения (для краткости индекс  $r$ , соответствующий региону, будем, как правило, опускать): *TotalWealth* — суммарное благосостояние всех регионов;  $nw_r$  — вес Негиши региона  $r$ , отражающий уровень использования благосостояния на потребление,  $\sum_r nw_r = 1$ ;  $W_r$  — благосостояние региона  $r$ ;  $udf_i$  — коэффициент дисконтирования полезности,  $\log C_i$  — функция полезности, выбранная в виде десятичного логарифма потребления  $C_i$  (характерным свойством функции полезности является то, что ее вторая производная отрицательна, в этом случае маргинальная полезность всегда положительна, но является убывающей функцией совокупного уровня потребления).

Сформулированная оптимизационная задача является задачей нелинейного программирования; для ее решения используется метод последовательной совместной максимизации, причем теоретически обоснована сходимость этого метода к равновесному решению на всем временном интервале [14]. Ниже приведена конкретизация важнейших переменных, по которым проводится оптимизация и которые варьируются при организации вычислительных экспериментов.

Коэффициент дисконтирования полезности выбирается следующим образом:

$$udf_i = \prod_{j=0}^{i-1} (1 - udr_j)^{\delta_{j+1}},$$

$$udr_j = kpvs / kgdp - depr_j - grow_j,$$

где  $udr_j$  — среднегодовой на  $[t_j, t_{j+1})$  уровень дисконтирования полезности,  $kpvs$  — оптимальная доля капитала в паре «капитал — труд»,  $kgdp$  — начальное отношение капитала к ВВП,  $depr_j$  — среднегодовой коэффициент амортизации,  $grow_j$  — среднегодовой прирост потенциального ВВП.

Потребление  $C_i$  в момент времени  $t_i$  определяется по классической формуле [13]:

$$C_i = Y_i - I_i - EC_i - NTX_i,$$

где  $Y_i$  — общий объем экономической продукции, произведенной за год  $t_i$ ;  $I_i$  — текущие инвестиции (годовой поток);  $EC_i$  — средства, необходимые для возмещения энергетических

затрат;  $NTX_i$  — разность между региональным экспортом и импортом потребительских товаров (очевидно, что для каждого товара в любой период времени  $\sum NTX_{i,r} = 0$ ).

Полагаем, что внутри энергетического сектора выделяются только два вида продукции, а именно, электрическая и неэлектрическая энергия. Товарами на международном рынке топлива выступают нефть, газ и уголь.

Экономическая производственная функция, описывающая динамику региональной продукции  $Y_i$ , зависит от четырех входов:  $K_i$  — капитала,  $L_i$  — труда,  $E_i$  — электрической энергии и  $N_i$  — неэлектрической энергии. Чтобы минимизировать количество параметров, требующих калибровки или эконометрической оценки, производственная функция описывается с помощью двух составляющих типа Кобба — Дугласа (капитально-трудоу и энергетической), вложенных в функцию с постоянной эластичностью замещения (CES):

$$Y_i = (aK_i^{\rho\alpha} L_i^{\rho(1-\alpha)} + bE_i^{\rho\beta} N_i^{\rho(1-\beta)})^{1/\rho}.$$

Здесь  $Y_i$  — объем продукции, произведенной за год  $t_i$ . Соотношение базируется на следующих предположениях:

— входящие в уравнение четыре входа масштабированы;

— между капиталом и трудом единичная эластичность, причем  $\alpha$  — оптимальная доля капитала в этой паре,  $\alpha = kpvs$ ;

— между электрической и неэлектрической энергией единичная эластичность, причем  $\beta$  — оптимальная доля электричества в этой паре,  $\beta = elvs$ ;

— между этими парами входов постоянная эластичность  $esub$ ,  $\rho = 1 - \frac{1}{esub}$ , причем  $esub$  не равно 0 или 1;

— масштабирующие множители  $a$  и  $b$  таковы, что потребности в энергии в начальный год согласуются с базовой ценой неэлектрической энергии, и в масштабирующем коэффициенте  $b$  отражена скорость улучшения энергоэффективности ( $aeei$ ), определяющая энергоёмкость ВВП.

Динамика регионального капитала удовлетворяет следующему уравнению:

$$K_i = K_{i-1}(1 - depr_{i-1})^{\delta_i} + af(I_{i-1}(1 - depr_{i-1})^{\delta_i} + I_i),$$

где  $af$  — коэффициент накопления, зависящий от величины  $\delta_i$ , начальные инвестиции  $I_0$  заданы, в конечный момент времени должно выполняться ограничение вида

$I_n \geq K_n(grow_n + depr_n)$ . Труд  $L_i$  (в модели рабочая сила, измеряемая в условных единицах эффективности) фактически является экзогенным параметром и вычисляется явно:

$$L_i = L_{i-1}(1 + grow_{i-1})^{\delta_i}.$$

Величина  $EC_i$  зависит от производства электрической энергии  $E_i$ , неэлектрической энергии  $N_i$ , ценовых параметров (таких, как  $intpr$  — базовая международная цена на нефть,  $ogdp$  — разница в ценах на нефть и газ,  $pnref$  — базовая внутренняя цена неэлектрической энергии,  $decf$  — максимальная величина ежегодного снижения цен на передовые технологии), коэффициентов, характеризующих конкретные энергетические технологии и их соотношения (например,  $nshf$  соответствует максимальной доле электрической энергии на рынке), и находится явно (формула опущена здесь ввиду ее громоздкости). Отметим, что в модели вводятся ограничения на годовое изменение объемов производства электрической и неэлектрической энергии.

Итак, основными оптимизируемыми параметрами задачи максимизации суммарного благосостояния Негиши являются электрическая энергия  $E_i$ , неэлектрическая энергия  $N_i$ , инвестиции  $I_i$  и разность между экспортом и импортом  $NTX_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ).

В заключение описания экономико-энергетического модуля приведем его основные входы и выходы. Входные параметры: население, его динамика, прогноз роста ВВП на душу населения; макроэкономические параметры ( $grow$ ,  $depr$ ,  $aeei$ ,  $kpvs$ ,  $elvs$ ,  $esub$  и др.); энергетические характеристики и коэффициенты. Выходные параметры: оптимальная динамика экономического развития региона, в частности, реализовавшийся ВВП и его характеристики (карбонемкость, структура — потребление, инвестиции, экспорт и импорт); энергетические выбросы парниковых газов (определяются величиной ВВП, его энергоёмкостью и углеродными показателями энергопотребления); гипотетические затраты на снижение выбросов в соответствии с внешними ограничениями (например, по типу Киотского протокола).

### 3. Результаты вычислительного эксперимента

Адаптация модели к текущему состоянию мировой и региональной экономики включала: 1) использование новых входных данных (макроэкономических параметров, энергетических характеристик, запасов различных

ресурсов и др.) из современных источников [2, 4, 5, 6, 8, 10, 15]; 2) изменения в математической модели для реализации дополнительных возможностей экономической динамики (например, для учета спада большинства экономик, обусловленного кризисом 2008–2010 гг.); 3) новое, по сравнению с [7, 9, 11–13], деление сложного и неоднородного мира на регионы, исходя из последних тенденций развития мировой экономики и с учетом планируемых вычислительных экспериментов (например, по комплексному анализу возможных предпочтений скоординированного социально-экономического развития России и ближайших соседей). Коротко прокомментируем каждый пункт. Перечислить новые входные данные модели в рамках данной статьи не представляется возможным ввиду их объема, поэтому ограничимся соответствующими ссылками на ресурсы [2, 4, 5, 6, 8, 10, 15]. Адаптивные изменения в алгоритмической части были описаны в предыдущем разделе.

Разрабатываемая версия MERGE предполагает следующее деление мира на регионы: 1) США; 2) OECD Европа (OECD — Организация экономического сотрудничества и развития); 3) Япония; 4) Корея; 5) Австралия и Новая Зеландия; 6) Канада; 7) Ближний Восток; 8) Африка; 9) Китай; 10) Индия; 11) прочая Азия; 12) Бразилия; 13) Центральная и Южная Америка; 14) non-OECD Европа и Евразия; 15) Россия; 16) Украина (последние два извлекаются из региона 14).

Стартовым годом для моделирования решено сделать 2008 г. (обоснование: наличие необходимых данных, начало серьезных (и пока не вполне формализованных) изменений в мировой экономике и первый год действия Киотского протокола, важной природоохранной инициативы, результативность которой пока не оценена количественно).

Основными целями вычислительного эксперимента, описываемого в данной работе, являлись анализ возможных траекторий экономического развития России и изучение последствий участия страны в инициативах по снижению выбросов парниковых газов типа Киотского протокола при различных предположениях на динамику экономико-энергетических параметров. В качестве источника модельных сценариев развития российской экономики был выбран прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года, выполненный Минэкономразвития РФ [4]. В указанном документе рассматривались три основных

сценария: консервативный, инновационный и форсированный (целевой); их специфика вытекает из разных моделей поведения бизнеса и государственной политики обеспечения макроэкономической сбалансированности. Четвертым сценарием считался базовый вариант входных данных MERGE, сформированный, главным образом, на основе оценок экспертов Администрации энергетической информации и Всемирного Банка [10, 15]. Приведем краткую характеристику каждого сценария.

*Консервативный сценарий* (ниже *Con — conservative*) характеризуется умеренными долгосрочными темпами роста экономики на основе модернизации топливно-энергетического и сырьевого секторов при сохранении относительного отставания в высокотехнологичных секторах. Среднегодовые темпы роста ВВП оцениваются на уровне 3,2% в 2013–2030 гг. Экономика увеличится к 2030 г. в 2 раза, а доля России в мировом ВВП несколько уменьшится — с 3,8% в 2012 г. до 3,6% в 2030 г.

*Инновационный сценарий* (ниже *Inn — innovative*) предполагает значительно более сложную модель управления для государства и для бизнеса, превращение инновационных факторов в ведущий источник экономического роста и прорыв в повышении эффективности капиталоотдачи и снижении энергоемкости ВВП на рубеже 2020–2022 гг., что позволит улучшить социальные параметры развития. Среднегодовые темпы роста российской экономики оцениваются на уровне 4,1% в 2013–2030 гг., что будет превышать рост мировой экономики.

*Форсированный сценарий* (ниже *Upr — uprated*) разработан на базе инновационного сценария, при этом он характеризуется форсированными темпами роста, повышенной нормой частных накоплений и созданием мощного экспортного сектора продукции с высокой добавленной стоимостью. Сценарием предусматривается реализация задач, поставленных в указах Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 г. № 596-606, в которых закреплены целевые ориентиры развития страны на период до 2020 г. (создание и модернизация высокопроизводительных рабочих мест, значительное увеличение объема инвестиций, относительный рост доли продукции высокотехнологичных и наукоемких отраслей экономики в ВВП, мероприятия по реализации государственной социальной политики). Среднегодовые темпы роста ВВП повышаются до 5,4%, что позволит увеличить долю России в мировой экономике до 5,3% мирового ВВП к 2030 г.

Основные показатели сценариев социально-экономического развития Российской Федерации на 2010–2030 гг.  
(среднегодовые темпы прироста, %)

Показатель	Сценарий	2010	2011–2015	2016–2020	2021–2025	2026–2030
Валовой внутренний продукт	<i>Upr</i>	4,3	4,6	6,8	5,3	4,2
	<i>Inn</i>	4,3	4,0	4,4	4,0	3,7
	<i>Con</i>	4,3	3,6	3,6	3,0	2,5
	<i>Ref</i>	4,3	3,4	2,5	2,7	3,3
Численность населения	<i>Upr</i>	0,01	0,28	0,36	0,31	0,27
	<i>Inn</i>	0,01	0,13	0,0	-0,11	-0,18
	<i>Con</i>	0,01	0,13	0,0	-0,11	-0,18
	<i>Ref</i>	0,01	-0,31	-0,44	-0,45	-0,46
Инвестиции в основной капитал	<i>Upr</i>	6,0	9,6	12,6	7,1	4,0
	<i>Inn</i>	6,0	7,8	6,6	5,5	4,8
	<i>Con</i>	6,0	7,4	5,1	4,3	3,6
	<i>Ref</i>	6,0	4,4	4,0	3,9	3,8
Энергоемкость ВВП	<i>Upr</i>	-0,03	-2,4	-5,6	-4,0	-2,7
	<i>Inn</i>	-0,03	-2,0	-3,3	-2,9	-2,3
	<i>Con</i>	-0,03	-1,7	-2,6	-2,1	-1,3
	<i>Ref</i>	-0,03	-2,8	-2,2	-2,2	-2,4

Отметим, что, по мнению авторов документа [4], консервативный сценарий отражает доминирующие в настоящее время (после кризиса 2008–2010 гг.) интересы в российской экономике и характеризуется более высокой вероятностью реализации, чем инновационный и форсированный сценарии.

*Базовый сценарий MERGE* (ниже *Ref* – *reference*) отражает скептическое отношение западных экспертов к кратко- и среднесрочным перспективам инновационного развития российской экономики. Среднегодовые темпы роста ВВП в 2013–2030 гг. оцениваются в диапазоне 2,4–3,3%, темпы снижения энергоемкости ВВП стабильны, но относительно невелики, доля экспорта энергоресурсов в ВВП практически постоянна.

Дополнительно отметим несколько фактов. Только вариант *Upr* ориентируется на так называемый высокий сценарий демографического прогноза численности населения России, разработанного Росстатом с учетом итогов Всероссийской переписи населения 2010 г., именно изменение от 142,9 млн чел. в 2010 г. до 151,4 млн чел. в 2030 г.; все прочие варианты опираются на средний сценарий демографического прогноза со стабилизацией численности населения (142,5 млн чел. в 2030 г.).

В инновационном и форсированном сценариях выделяется *экологический вариант* [4]. Значительное усиление требований к экологичности экономического развития объясняется, помимо очевидных причин, возможным подписанием Россией соглашений по снижению антропогенной эмиссии парниковых газов по типу Киотского протокола (с обязательствами не превышения в 2020 г. уровня выбросов 1990 г.

и уменьшения их к 2050 г. на 30–50% от указанного уровня). При экологическом сценарии развития предполагается изменение структуры используемых топливно-энергетических ресурсов со снижением доли ископаемого топлива (особенно угля и видов топлива с высоким содержанием серы), замещением твердого топлива газом и увеличением доли энергии, вырабатываемой на ГЭС и АЭС, а также возобновимых источников энергии. По некоторым оценкам, ужесточение экологических требований может значительно видоизменить параметры экономического развития и привести к снижению темпов роста ВВП по сравнению с основным сценарием на 0,3–0,5 процентных пункта в год после 2020 г. В связи с этим важно проверить, насколько реально достижение уровня выбросов 1990 г. в ближайшем будущем во всех рассматриваемых сценариях.

Ключевые параметры сценариев сведены в таблицу (табл. 1).

Для каждого сценария модель MERGE предусматривает два варианта: вариант R0, характеризующийся отсутствием всяких ограничений на выбросы парниковых газов, и вариант R1, в котором предполагается, что для достижения целей в русле Киотского договора используются только локальные природоохранные меры (без учета торговли квотами на выбросы и прочих механизмов перераспределения квот). Разность ВВП, полученных в этих вариантах, фактически характеризует гипотетические затраты на снижение эмиссий.

Приведем результаты модельных расчетов на промежутке от 2008 г. до 2030 г.

Из рисунка 1 заключаем, что во всех сценариях социально-экономического развития

РФ эмиссии CO<sub>2</sub> даже не приближаются на всем промежутке к уровню 1990 г. (так называемый киото-уровень для России, 0,646 млрд т углеродного эквивалента), достигая максимума (81% от киото-уровня) в 2010–2013 гг. в прогнозных сценариях *Con*, *Inn* и *Upr*. Затем наблюдается некоторое снижение выбросов, которое объясняется главным образом запланированным уменьшением энергоемкости ВВП.

Расчеты во всех модельных вариантах свидетельствуют о наличии у России резервов для «безболезненного» участия в природоохранных инициативах типа Киотского протокола, которые активно обсуждаются в настоящее время, если речь идет о непревышении в 2020 г. уровня выбросов 1990 г. В то же время отметим, что уменьшение эмиссий к 2050 г. на 30–50% от указанного уровня выглядит весьма проблематичным. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что расчет варианта R1 с обязательным регулированием эмиссий на рассматриваемом временном промежутке 2008–2030 гг., нецелесообразен, поэтому в экспериментах резонно ограничиться вариантом R0.

Рисунок 2 информирует, что при модельных предположениях динамика российского ВВП для всех сценариев примерно одинакова на интервалах 2008–2015 гг. (кризисное падение с последующим медленным ростом) и 2016–2030 гг. (существенный рост, окончательное преодоление последствий кризиса). Прогнозируемый ВВП в самом прогрессивном сценарии *Upr* ощутимо отрывается (на 20–40% к 2030 г.) от ВВП в альтернативных вариантах. Отметим, что ВВП в сценарии *Ref* существенно отстает от ВВП в других сценариях (в том числе в сценарии *Con*), что объясняется скептическим отношением к перспективам развития российской экономики со стороны западных экспертов.

На рисунке 3 представлена динамика производства энергии. Отметим, что перспективы российской энергетики с точки зрения Администрации энергетической информации и Всемирного Банка и с точки зрения Минэкономразвития РФ относительно схожи (так, по сценариям *Upr* и *Inn* к 2030 г. энергии будет производиться почти 60 EJ (экзаджоулей), а по сценарию *Ref* — около 55 EJ). Снижение производства вплоть до 2020 г., очевидно, обусловлено не падением спроса, а прогнозируемым ростом энергоэффективности ВВП во всех сценариях (см. табл. 1) на фоне локального снижения экспорта нефти.

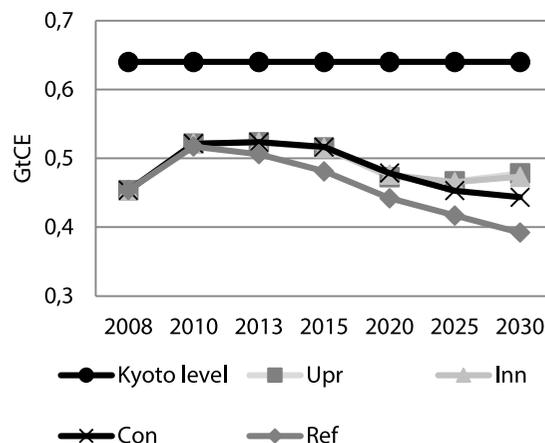


Рис. 1. Эмиссии CO<sub>2</sub> в млрд т углеродного эквивалента; вариант R0 для модельных сценариев (Kyoto level — уровень эмиссий России 1990 г.)

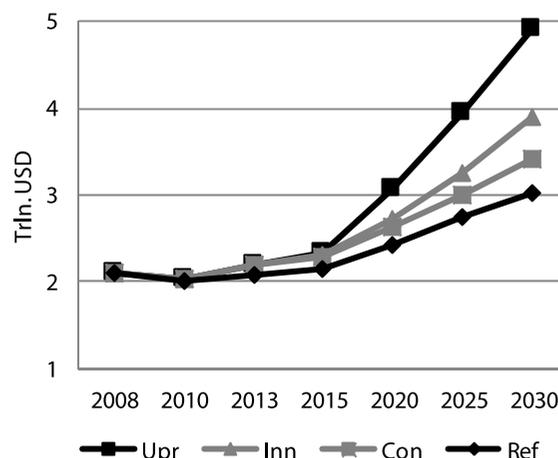


Рис. 2. Реализованный ВВП в трлн долл. США 2005 г.

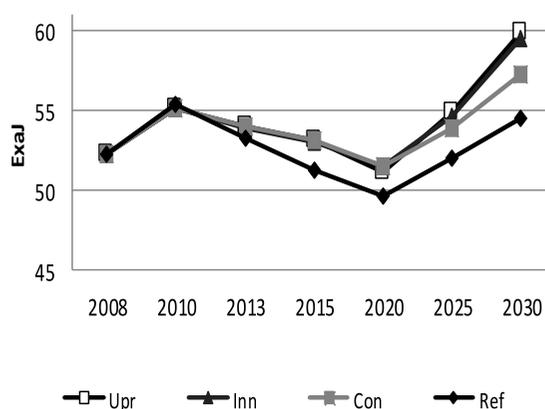


Рис. 3. Производство энергии (суммарно электрической и неэлектрической, в экзаджоулях)

Анализируя структуру источников первичной энергии (табл. 2), отметим, что различия между сценариями носят поверхностный характер. Выделим несколько общих тенденций. Так, доли гидроэнергии и особенно ядерной энергии стабильно увеличиваются со временем за счет уменьшения доли производства энергии из нефти. Во всех сценариях, кроме

Таблица 2  
Структура источников первичной энергии (в % от суммарного потребления)

Год	Сценарий	газ	нефть	уголь	гидро	атомн.
2010	<i>Upr</i>	50,5	25,5	19,0	2,5	2,5
	<i>Inn</i>	50,5	25,5	19,0	2,5	2,5
	<i>Con</i>	50,5	25,5	19,0	2,5	2,5
	<i>Ref</i>	51,0	24,8	19,2	2,5	2,5
2013	<i>Upr</i>	51,6	24,0	19,0	2,7	2,7
	<i>Inn</i>	51,6	24,0	19,0	2,7	2,7
	<i>Con</i>	51,6	24,0	19,0	2,7	2,7
	<i>Ref</i>	51,1	23,7	19,6	2,8	2,8
2015	<i>Upr</i>	52,3	23,0	18,9	2,9	2,9
	<i>Inn</i>	52,2	23,1	18,9	2,9	2,9
	<i>Con</i>	52,4	23,0	18,8	2,9	2,9
	<i>Ref</i>	50,3	23,5	20,0	3,1	3,1
2020	<i>Upr</i>	50,9	22,0	19,8	3,1	4,2
	<i>Inn</i>	51,1	21,8	19,7	3,1	4,3
	<i>Con</i>	51,3	21,8	19,6	3,1	4,2
	<i>Ref</i>	49,0	22,3	20,8	3,4	4,5
2025	<i>Upr</i>	51,9	19,6	19,6	3,6	5,3
	<i>Inn</i>	51,8	19,7	19,6	3,6	5,3
	<i>Con</i>	50,3	20,3	20,3	3,7	5,4
	<i>Ref</i>	47,3	21,0	21,9	4,0	5,8
2030	<i>Upr</i>	52,5	19,2	19,2	3,7	5,4
	<i>Inn</i>	52,3	19,1	19,3	3,8	5,5
	<i>Con</i>	51,1	18,4	20,5	4,2	5,8
	<i>Ref</i>	45,4	20,1	23,2	4,7	6,6

*Ref*, вклад газа и угля (в процентах) остается практически неизменным, при этом газ является основным источником производства энергии. Его доля стабильно превышает 50% во всех сценариях, кроме *Ref*, в котором за 20 лет она уменьшается на 5,5%, причем газ вытесняется углем, запасы которого гораздо больше. Этот факт отражает мнение экспертов о повышении роли угля в мировой энергетике вообще и в энергетике развивающихся экономик особенно [5, 10, 8]. Отметим, что продолжение вычислений за горизонт 2030 г. демонстрирует резкое падение долей традиционных ресурсов (нефти и газа) вследствие истощения их запасов. В перспективе альтернативные возобновимые источники энергии (такие как энергия биомассы, солнечная энергия, геотермальная энергия и т. д.) будут играть все более замет-

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-01-00175-а) и программы Президиума РАН «Перспективы скоординированного социально-экономического развития России и Украины в общеевропейском контексте», проект 12-П-1-1038.

#### Список источников

1. Бобылев С. Н., Ходжаев А. Ш. Экономика природопользования. — М.: ТЕИС, 1997. — 272 с.
2. Государственная служба статистики (Госстат) Украины. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/>

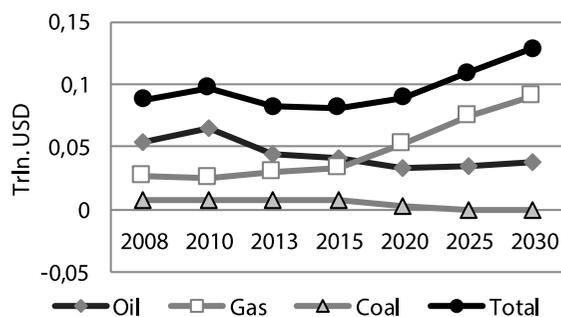


Рис. 4. Российский экспорт ископаемого топлива в трлн. долл. США 2005 г.; сценарий *Inn*. Обозначения: Oil — нефть, Gas — газ, Coal — уголь, Total — всего

ную роль [5], хотя их вклад в российскую энергетику на рассматриваемом временном интервале пренебрежимо мал.

Проведен анализ временной динамики российского экспорта ископаемого топлива для сценария *Inn* (см. рис. 4, в других сценариях траектории очень похожи). Наблюдается стабильное увеличение с некоторого момента экспорта газа, при этом динамика экспорта нефти практически не меняется, а торговля углем сходит на нет к 2025 г. Вызвано это заложенным в модели прогнозируемым ростом спроса на газ со стороны крупнейших импортеров топлива. Спрос на уголь на мировом рынке растет не столь значительными темпами и удовлетворяется за счет увеличения поставок такими экспортерами, как Австралия. Отметим, что основные данные по экспорту — импорту ископаемого топлива и тенденции динамики взяты из [10]. Можно предположить, что при необходимости ограничения (снижения) выбросов парниковых газов, согласно гипотетическим инициативам типа Киото, увеличения экспорта газа не произошло бы по причине возрастания внутренней потребности России в природном газе как менее карбоноёмком топливе.

Отметим, что модельная динамика, представленная на рис. 1–4 и в табл. 2, является оптимальной с точки зрения MERGE на всем рассматриваемом промежутке времени (в этом и состоит специфика модели); этот факт вполне может быть причиной существенного отклонения результатов моделирования от экспертных оценок изменения того или иного параметра на конкретном небольшом интервале.

3. Кокорин А. О., Грицевич И. Г., Сафонов Г. В. Изменение климата и Киотский протокол — реалии и практические возможности. — М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF) — Россия, 2004. — 64 с.
4. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года. Минэкономразвития Российской Федерации, Москва, 2013. 354 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.economy.gov.ru/minec/activity/sections/macro/prognoz/>
5. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года, Институт энергетических исследований РАН, Аналитический Центр при Правительстве РФ, 2013. [Электронный ресурс] URL: <http://ineiran.ru/articles/prognoz-2040.pdf>
6. Федеральная служба государственной статистики (Росстат) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru>
7. Digas B., Maksimov V., Schrattenholzer L. On costs and benefits of Russia's participation in the Kyoto Protocol // Interim Report IR-09-001. — Laxenburg : IIASA, 2009. — 34 pp.
8. Energy Study 2012. Reserves, Resources and Availability of Energy Resources. — Hannover : The Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), 2011. — 94 pp. [Electronic resource]. URL: [http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/energie\\_node.html](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/energie_node.html)
9. Gritsevskii A., Schrattenholzer L. Costs of reducing carbon emissions: an integrated modeling framework approach // Climate Change. — 2003. — No.56. — P. 167-184.
10. International Energy Outlook IEO-2011, U.S. Energy Information Administration (EIA), 2011. 301 pp. [Electronic resource]. URL: <http://www.eia.gov>
11. Kryazhimsky A., Minullin Ya., Schrattenholzer L. Global long-term energy-economy-environment scenarios with an emphasis on Russia // Perspectives in Energy Journal. — 2005. — Vol. 9. — P. 119-137.
12. Manne A. Energy, the environment and the economy: hedging our bets // Global Climate Change / Ed. by J. M. Griffin. Edward Elgar. — Northampton, MA, 2000.
13. Manne A., Mendelson R., Richels R. MERGE — a Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG reduction policies // Energy Policy. — 1995. — Vol. 23. — No. 1. — P. 17-34.
14. Rutherford T. Sequential joint maximization // Energy and Environmental policy Modeling / Ed. by J.P. Weyant. Kluwer Academic Publishers. — Norwell, MA, 1999. — P. 139-175.
15. World Development Indicators, The World Bank, 2013. <http://www.worldbank.org/>

### Информация об авторах

**Дигас Борис Вадимович** (Екатеринбург, Россия) — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник отдела дифференциальных уравнений, Институт математики и механики Уральского отделения Российской академии наук (620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 16, e-mail: digas@imm.uran.ru).

**Розенберг Валерий Львович** (Екатеринбург, Россия) — кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела дифференциальных уравнений, Институт математики и механики Уральского отделения Российской академии наук (620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 16, e-mail: rozen@imm.uran.ru).

**B. V. Digas, V. L. Rozenberg**

### Comprehensive estimation model of MERGE: adaptation to current state of world economy

*The optimizing interdisciplinary MERGE model meant mainly for quantitative estimation of outcomes of various nature protection strategy is one of the tools used for studying the climate change problems. Components of a model are the economical and power module, climatic module and module of damage assessment. The main attention in work is paid to the MERGE model adaptation to a world economy current state, and analysis of possible trajectories of economic development of Russia and studying of consequences of country participation in initiatives for emission abatement of greenhouse gases at the various assumptions on dynamics of regional economic and power indicators. As a source of model scenarios of development of the Russian economy, the forecast of long-term socio-economic development of the country for the period up to 2030 is used. They made by the Ministry of Economic Development of the Russian Federation (namely, the conservative, innovative and forced scenarios defined by different models of state policy for ensuring macroeconomic balance are considered).*

**Keywords:** complex estimated models, intertemporal optimization, scenarios of economic development, emission of greenhouse gases

*Work is completed with financial support from the Russian Federal Property Fund (Project 12-01-00175-a) and Program of Presidium of the Russian Academy of Sciences «Prospects for the coordinated socio-economic development of Russia and Ukraine in the all-European context», the project 12-P-1-1038.*

### References

1. Bobylev S. N., Khodzhaev A. Sh (1997). Ekonomika prirodopolzovaniya [Environmental economics]. Moscow, TEIS, 272.
2. Gosudarstvennaya sluzhba statistiki (Gosstat) Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine(Gosstat)]. Available at: <http://www.ukrstat.gov.ua/>
3. Kokorin A. O., Gritsevich I. G., Safonov G. V. (2004). Izmeneniye klimata i Kiotskiy protokol — realii i prakticheskiye vozmozhnosti [Climate change and the Kyoto Protocol — realities and practical opportunities]. Moscow, Vsemirnyy fond dikoy prirody (WWF) — Russia [World Wide Fund for Nature (WWF)], 64.
4. Prognoz dolgosrochnogo sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda. Minekonomrazvitiya Rossiyskoy Federatsii [The forecast of long-term socio-economic development of the Russian Federation

for the period up to 2030. Ministry of Economic Development of the Russian Federation] (2013) Moscow, 354. Available at: <http://www.economy.gov.ru/minec/activity/sections/macro/prognoz/>

5. Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii do 2040 goda. Institut energeticheskikh issledovaniy RAN. Analiticheskiy Tsentri Pravitelstva RF [The forecast of development of power of the world and Russia up to 2040, Power Research Institute of the Russian Academy of Sciences, the Analytical Center for the Government of the Russian Federation]. (2013). Available at: <http://ineiran.ru/articles/prognoz-2040.pdf>

6. Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki (Rosstat) [Federal State Statistics Service (Rosstat)]. Available at: <http://www.gks.ru>

7. Digas B., Maksimov V., Schrattenholzer L. On costs and benefits of Russia's participation in the Kyoto Protocol. Interim Report IR-09-001. Laxenburg : IIASA, 2009. 34 pp.

8. Energy Study 2012. Reserves, Resources and Availability of Energy Resources. — Hannover : The Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), 2011. 94 pp. Available at: [http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/energie\\_node.html](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/energie_node.html)

9. Gritsevskii A., Schrattenholzer L. Costs of reducing carbon emissions: an integrated modeling framework approach. Climate Change. 2003. No.56. P. 167-184.

10. International Energy Outlook IEO-2011, U.S. Energy Information Administration (EIA), 2011. 301 pp. Available at: <http://www.eia.gov>

11. Kryazhimsky A., Minullin Ya., Schrattenholzer L. Global long-term energy-economy-environment scenarios with an emphasis on Russia. Perspectives in Energy Journal. 2005. Vol. 9. P. 119-137.

12. Manne A. Energy, the environment and the economy: hedging our bets. Global Climate Change. Ed. by J. M. Griffin. Edward Elgar. Northampton, MA, 2000.

13. Manne A., Mendelson R., Richels R. MERGE — a Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG reduction policies. Energy Policy. 1995. Vol. 23. No. 1. P. 17-34.

14. Rutherford T. Sequential joint maximization. Energy and Environmental policy Modeling. Ed. by J.P. Weyant. Kluwer Academic Publishers. Norwell, MA, 1999. P. 139-175.

15. World Development Indicators, The World Bank, 2013. Available at: <http://www.worldbank.org/>

### Information about the authors

**Digas Boris Vadimovich** (Yekaterinburg, Russia) — PhD in Physical and Mathematical Sciences, Research Scientist of the Department of Differential Equations, Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (620990, Yekaterinburg, 16 S.Kovalevskaya st., e-mail: digas@imm.uran.ru).

**Rozenberg Valeriy Lvovich** (Yekaterinburg, Russia) — PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Research Scientist of the Department of Differential Equations, Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (620990, Yekaterinburg, 16 S. Kovalevskaya st., e-mail: rozen@imm.uran.ru).