
**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

**МОДЕЛЬ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ
ОГРАНИЧЕНИЯ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ**

© 2010 г. В.А. Малахов, Т.Г. Дубынина

(Москва)

Описывается нелинейная оптимизационная межотраслевая модель для прогнозных исследований макроэкономических последствий различных мер по ограничению эмиссии парниковых газов в стране. Рассматривается эмиссия парниковых газов при использовании топлива в различных секторах экономики, летучие выбросы в отраслях ТЭК и эмиссия парниковых газов в промышленных процессах углеродоемких отраслей. В заключение описываются результаты модельных расчетов, проведенных на основе сценария развития экономики, разработанного Минэкономразвития России в 2008 г.

Ключевые слова: нелинейная оптимизационная межотраслевая модель, парниковые газы, выбросы, карбоноёмкие отрасли, сценарий экономического развития 2008.

1. ЦЕЛИ РАЗРАБОТКИ И ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИ

В последние десятилетия в мировом сообществе стали широко обсуждаться оценки возможных последствий различных мер, направленных на ограничение эмиссии парниковых газов (ПГ), связанных с антропогенной деятельностью. Принятые рядом стран в рамках выполнения условий Киотского протокола (в период до 2012 г.) количественные ограничения выбросов парниковых газов предусматривают стабилизацию или незначительное снижение их объемов по сравнению с реперным годом. В посткиотский период государствам – участникам Киотского протокола скорее всего предстоит сформировать долгосрочные стратегии устойчивого развития их экономик, ориентированные на масштабное ограничение эмиссии парниковых газов, обеспечивающее максимально возможное снижение экологической нагрузки при минимальном ущербе для темпов экономического роста.

В последние годы за рубежом был проведен ряд комплексных исследований оценки возможных макроэкономических последствий реализации различных сценариев эмиссии парниковых газов (Department of Trade and Industry, 2005; Electric Power Research Institute, 2008; Stern, 2006). В этих работах анализируется экономический ущерб (в терминах снижения ВВП), связанный с дополнительными капиталовложениями в технологии, позволяющие снизить выбросы ПГ, введением квот и штрафов за выбросы, а также с новым ростом цен на топливо и энергию, вызванным дополнительными капитальными и эксплуатационными затратами в отраслях ТЭК. Эти исследования выявили серьезные расхождения в количественной оценке макроэкономических последствий реализации мер по ограничению эмиссии ПГ. Авторы этих исследований подчеркивают необходимость развития методологии и соответствующего модельного инструментария исследований. Особенно актуальной такая задача является для России, поскольку страна с заметным опозданием подключилась к Киотскому процессу и пока не рассматривает возможные экологические ограничения как значимые при разработке таких ключевых программных документов, как долгосрочные программы социально-экономического развития и энергетическая стратегия страны.

В 2008 г. ИНЭИ РАН расширил и модернизировал экологические блоки своего модельно-информационного инструментария прогнозирования развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России. В частности, на основе модернизации существующей макроэкономической нелинейной оптимизационной модели МЭНЭК (“Модель энергетики в экономике”) (Шапот, Лукацкий, 2002, с. 680–691) построена межотраслевая модель для исследования макроэкономических последствий сценариев ограничения эмиссии парниковых газов (МЭНЭК–ЭКО). В ней более подробно рассмотрены отдельные углеродоемкие отрасли: электроэнергетика, ме-

таллургическое и химическое производство, производство прочих неметаллических минеральных продуктов (стройматериалов).

Модель позволяет изучать влияние экономических и технологических мер по снижению эмиссии ПГ:

- на перспективную динамику и отраслевую структуру выбросов ПГ (CO_2 , CH_4 , N_2O и совокупности прочих ПГ) в России;
- перспективные объемы и эффективность энергопотребления в стране;
- динамику и структуру экономики России;
- основные показатели консолидированного бюджета РФ и динамику жизненного уровня населения;
- динамику производства и инвестиций, финансовое состояние производственных отраслей экономики.

Модельно-информационный комплекс позволяет проводить ретроспективный анализ и прогнозировать развитие экономики на перспективу до 15 лет.

Модель МЭНЭК–ЭКО разработана путем модернизации и реструктуризации базовой макроэкономической модели МЭНЭК. Модернизация модели продиктована необходимостью развертывания экологического блока, в котором моделируются процессы эмиссии различных видов парниковых газов в производственных секторах экономики России. При этом понятийно-информационная структура модели МЭНЭК–ЭКО максимально соответствует терминам и понятиям действующей в стране официальной статистики. Все расчеты максимально опираются на статистические данные Росстата.

Для подробного анализа углеродоемких отраслей потребовалось изменить номенклатуру моделируемых отраслей (в классификации ОКВЭД – видов экономической деятельности). Кроме того, реструктуризации подверглись финансовые балансы отраслей экономики и состав доходов консолидированного бюджета РФ, теперь их данные позволяют ввести в модель платежи за эмиссию ПГ.

Представляется, что одним из самых действенных стимулов снижения эмиссии ПГ является введение платы за выбросы этих газов. Размер платы должен быть пропорционален объему эмиссии, которую допускает хозяйствующий субъект (в модели – производственная отрасль). Тем самым ужесточение бюджетных ограничений в отраслях экономики должно стимулировать снижение выбросов и влиять (путем сокращения и удорожания финансовых ресурсов) на динамику инвестиций, производства и удельных материальных затрат. Моделирование зависимости текущих и перспективных объемов инвестиций и производства в отраслях экономики от их финансового состояния и их связь с объемами эмиссии ПГ требуют отказаться от хорошо освоенных задач линейного программирования и решать многоэкстремальные задачи невыпуклого программирования высокой размерности и с большим числом ограничений. В частности, в модели МЭНЭК–ЭКО решается задача *полилинейного программирования* (Макаров, Шапот, Лукацкий, Малахов, 2002, с. 45–56; Шапот, Лукацкий, 2002, с. 680–691), в которой наряду с традиционными для макроэкономического моделирования независимыми переменными, определяющими показатели балансов производства и использования товаров и услуг в экономике (объемы производства, потребления и внешней торговли различных продуктов), присутствуют также (в качестве независимых переменных) показатели, определяющие финансовый баланс отраслей экономики.

2. СТРУКТУРА МОДЕЛИ МЭНЭК–ЭКО

МЭНЭК–ЭКО является межотраслевой моделью, в которой более подробно описаны энергетические продукты и углеродоемкие отрасли. Экономическими субъектами в ней являются государственные учреждения, совокупность домашних хозяйств и производственные отрасли экономики, представленные видами экономической деятельности согласно ОКВЭД. В качестве отраслей в модели представлены следующие виды экономической деятельности:

1. Сельское и лесное хозяйство, охота.
2. Добыча сырой нефти.
3. Газовая промышленность.
4. Добыча угля и торфа.
5. Добыча полезных ископаемых, кроме топливно-энергетических.
6. Производство пищевых продуктов, включая напитки и табак.
7. Текстильное и швейное производство.
8. Производство кожи, изделий из кожи и производство обуви.
9. Обработка древесины и производство изделий из дерева.
10. Целлюлозно-бумажное производство, издательская и полиграфическая деятельность.
11. Производство кокса и нефтепродуктов.
12. Химическое производство.
13. Производство резиновых и пластмассовых изделий.
14. Производство прочих неметаллических минеральных продуктов.
15. Металлургическое производство и производство готовых металлических изделий.
16. Производство машин и оборудования.
17. Производство электрооборудования, электронного и оптического оборудования.
18. Производство транспортных средств и оборудования.
19. Прочие обрабатывающие производства.
20. Производство и распределение электроэнергии, газа и воды (раздел Е по ОКВЭД) (в том числе электроэнергетика).
21. Строительство.
22. Транспорт и связь.
23. Прочие коммерческие услуги.

Экономические субъекты в модели производят и потребляют 29 продуктов (товаров и услуг). При этом пять видов экономической деятельности производят несколько принятых в модели продуктов. Сельское и лесное хозяйство, охота производят соответственно продукты сельского хозяйства и дрова. Добыча нефти дает в основном нефть и немного газа, газовая промышленность в основном производит газ, немного нефти (газоконденсата) и моторных топлив. Производство кокса и нефтепродуктов – моторное топливо, мазут топочный, кокс и прочие нефтепродукты. Электроэнергетика производит электроэнергию и централизованное тепло. Остальные виды экономической деятельности создают один агрегированный продукт с соответствующим названием.

Структурной основой модели МЭНЭК–ЭКО являются балансы производства и распределения указанных продуктов. Для каждого продукта приходная часть баланса содержит выпуск в основных ценах и импорт. Расходная часть баланса содержит следующие статьи:

- промежуточное потребление в производственных отраслях экономики;
- промежуточное потребление в домашних хозяйствах;
- расходы на валовое накопление основного капитала;
- конечное потребление домашних хозяйств;
- конечное потребление госучреждений;
- экспорт;
- изменение запасов готовой продукции.

В модели аналогом натуральных единиц измерения являются внутренние цены производителей базового года (последнего отчетного года), поэтому все составляющие баланса производства и распределения каждого продукта представлены во внутренней цене базового года соответствующего продукта. Промежуточное потребление товаров и услуг каждой отрасли определяется произведением вектора удельного промежуточного потребления этой отрасли на объем ее производства. Объем производства в каждой отрасли ограничен сверху размером производственных мощностей.

Необходимо отметить, что для углеродоемких отраслей вектор удельного промежуточного потребления продуктов представлен в виде линейной комбинации нескольких опорных (реперных) векторов удельного потребления, каждый из которых соответствует определенной технологии

производства и структуре выпускаемой продукции в отрасли. Коэффициенты указанных линейных комбинаций являются переменными модели. Отдельно для электроэнергетики уровни удельных капитальных вложений также представлены в виде той же линейной комбинации опорных значений, причем каждая соответствует одному из опорных векторов удельного потребления топлива в отрасли.

В отличие от продуктовых балансов все виды финансовых балансов в модели представлены в текущих ценах (в миллиардах рублей по прогнозным годам). МЭНЭК–ЭКО содержит финансовые балансы каждой рассматриваемой отрасли, бюджет доходов и расходов совокупности домашних хозяйств, сводный госбюджет страны, баланс добавленной стоимости в экономике в явном виде (счета производства и использования ВВП). Финансовый баланс каждой отрасли обеспечивается выполнением баланса расходов и доходов от ее операционной, инвестиционной и финансовой деятельности. В модели это условие определяется показателями укрупненного отчета о движении денежных средств каждой отрасли, в котором представлена сводная информация о результатах ее деятельности. Состав показателей отчета о движении средств представлен в табл. 1. Чистая прибыль каждой отрасли в свою очередь формируется на основе укрупненного отчета о прибылях и убытках (табл. 2).

Таблица 1. Показатели отчета о движении денежных средств отрасли

Направления деятельности	Поступления	Расходы
Операционная	Чистая прибыль	
	Амортизационные отчисления	
Инвестиционная		Капиталовложения во внеоборотные активы и в прирост чистого оборотного капитала
	Возврат предыдущих долгосрочных финансовых вложений	Долгосрочные финансовые вложения
Финансовая	Привлечение внешних средств (кредиты, облигации, эмиссия акций)	Возврат заемных средств (кредитов и облигаций)
		Дивиденды
	Средства госбюджета	

Таблица 2. Отчет о прибылях и убытках отрасли

+ Выручка (нетто) от продажи продукции на внутреннем и внешнем рынках (за вычетом НДС, акцизов, экспортных таможенных пошлин)	ж) прочие налоги в составе себестоимости
– Себестоимость продукции:	з) плата за выбросы парниковых газов
а) промежуточное потребление в ценах потребителя (материальные затраты + коммерческие и управленческие расходы)	и) прочие затраты
б) затраты на оплату труда	Прибыль (убыток) от продаж
в) скрытая оплата труда	+ Доход от финансовых вложений
г) отчисления на социальные нужды (ЕСН)	– Проценты к уплате
д) амортизационные отчисления	– Внереализационные расходы (налог на имущество)
е) НДС (для добычи нефти, газа и твердого топлива)	Прибыль (убыток) до налогообложения
	– Налог на прибыль
	Чистая прибыль (убыток) за период

Кроме того, в отрасли “Прочие коммерческие услуги” отдельно учитываются доходы от обязательных платежей населения (платежи по страхованию, взносы в общественные и кооперативные организации и др.) и денежные потоки от банковских операций (сальдо притока депозитов и выдаваемых кредитов).

Помимо продуктовых и финансовых балансов МЭНЭК содержит баланс трудовых ресурсов, который представлен ограничениями на уровень занятости. В частности, сверху он ограничен численностью трудоспособного населения, а снизу – максимально допустимым уровнем безработицы.

Состав независимых (искомых) переменных модели МЭНЭК–ЭКО определен следующими группами показателей:

- производство по отраслям (во внутренних ценах базового года);
- инвестиции по отраслям (во внутренних ценах базового года);
- экспорт каждого продукта (во внутренних ценах базового года);
- импорт каждого продукта (во внутренних ценах базового года);
- динамика изменений запасов готовых продуктов (во внутренних ценах базового года);
- отраслевые коэффициенты, определяющие технологию производства в углеродоемких отраслях (при поиске решения они определяют вектор удельного промежуточного потребления соответствующих отраслей);
- индексы средних оптовых цен каждого модельного продукта;
- уровни среднемесячной заработной платы по отраслям;
- уровень скрытой заработной платы по отраслям;
- привлекаемые займы по отраслям;
- отраслевые объемы дивидендных выплат;
- уровень среднемесячной заработной платы в государственных учреждениях;
- социальные выплаты населению;
- объем привлекаемых государственных займов;
- индекс потребительских цен;
- индекс реального роста доходов домашних хозяйств;
- объемы бюджетных средств, привлекаемых отраслями экономики (дотации, субсидии).

Всего в модели насчитывается 328 переменных.

Для каждого расчетного периода МЭНЭК–ЭКО содержит 7819 экзогенных параметров, включая ставки и нормы всех основных налогов, полностью соответствующие действующему Налоговому кодексу РФ. Кроме исходных параметров и искомых переменных МЭНЭК–ЭКО содержит большое число выходных характеристик (индикаторов). Они вычисляются с помощью простых алгоритмов на основе параметров и сформированных значений переменных (решений). Значения индикаторов определяют текущие результаты очередного периода прогнозов, а также изменение состояния экономики. Поэтому с их помощью формируется часть исходной информации для следующего цикла расчетов. Для каждого расчетного периода вычисляется 37 791 значение скалярных, векторных и матричных индикаторов.

Кроме структурных и балансовых ограничений МЭНЭК–ЭКО содержит ряд так называемых целевых ограничений, которые определяют задаваемые сценариями требования к качеству решений. Как правило, целевые ограничения накладываются на основные расчетные макроэкономические индикаторы или темпы их изменения (ВВП, доходы населения, индексы инфляции, объемы эмиссии парниковых газов и др.). Всего в модели МЭНЭК–ЭКО насчитывается 38 424 ограничения, включая 543 двусторонних ограничений на значения искомых переменных модели для каждого расчетного периода.

3. ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ БЛОК МОДЕЛИ МЭНЭК–ЭКО

В экологическом блоке модели МЭНЭК–ЭКО описывается эмиссия различных ПГ (CO_2 , CH_4 , N_2O и совокупности прочих парниковых газов). Для этого применяются данные о следующих процессах:

- выбросы ПГ, связанные с использованием топлив в различных секторах экономики;
- летучие выбросы (fugitive emissions) – выбросы ПГ при добыче и транспортировке угля, нефти и газа (включая сжигание в факелах);

- эмиссия ПГ при производственном использовании нетопливных полезных ископаемых (производственные процессы отдельно в промышленности стройматериалов, химической промышленности и металлургии);
- эмиссия ПГ в сельском хозяйстве (в зависимости от динамики производства в отрасли);
- эмиссия ПГ, связанная с отходами в промышленности и коммунально-бытовом секторе.

Для моделирования выбросов парниковых газов, связанных с использованием потребляемых видов топлива, для каждого моделируемого субъекта экономики (отраслей – видов экономической деятельности, госучреждений и домашних хозяйств) в модель введена зависимость уровня выбросов парниковых газов от объемов промежуточного и конечного потребления различных энергоресурсов (газ, уголь, мазут, моторное топливо) и дров (в домашних хозяйствах и сельском хозяйстве). При этом используются как национальные коэффициенты эмиссии парниковых газов, так и коэффициенты, рекомендованные Межгосударственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) при формировании национальных докладов об объеме выбросов ПГ, в том числе в России. В частности, в модели используются следующие коэффициенты эмиссии CO_2 и N_2O при потреблении топлива (табл. 3).

Таблица 3. Коэффициенты эмиссии CO_2 и N_2O при использовании ТЭР

Виды топлива	CO_2	N_2O
Дрова, т CO_2 экв./м ³	0.863114	0.009667
Природный газ, т CO_2 экв./тыс. м ³	1.871966	0.001045
Уголь и прочее твердое топливо*, т CO_2 экв./т	1.907930	0.009347
Моторное топливо**, т CO_2 экв./т	3.053069	0.008017
Мазут топочный, т CO_2 экв./т	3.075317	0.007468

* Средневзвешенное по ретроспективным объемам потребления углей, торфа, топлива печного и сланцев значение коэффициента.

** Средневзвешенное по ретроспективным объемам потребления различных видов моторного топлива значение коэффициента.

Что касается CH_4 , то объемы эмиссии этого газа зависят не только от вида потребляемого топлива, но и от отрасли, в которой потребляется соответствующее топливо (от вида технологического процесса преобразования). Поэтому в модель введена матрица коэффициентов эмиссии CH_4 .

Следует заметить, что существуют различия в трактовке эмиссии ПГ в промышленных процессах между методикой МГЭИК и алгоритмами модели МЭНЭК–ЭКО. Согласно методике МГЭИК к эмиссии ПГ в промышленных процессах относятся выбросы, обусловленные не только потреблением углерода в нетопливных видах ископаемых (перечень таких процессов приводится ниже), но и использованием ископаемого топлива в качестве сырья, восстановителей и для поддержания производства при помощи углеводородов в химических реакциях промышленных процессов. Остальная часть эмиссии от использования ТЭР относится к категории “Энергетика” и возникает в результате сжигания топлива с целью получения энергии, т.е. является “преднамеренным окислением материалов в аппаратах, предназначенных для производства тепла или механической работы для процесса либо для использования вне аппарата” (Руководящие принципы, 2006).

Однако такое разделение далеко не однозначно, поскольку ископаемое топливо во многих процессах используется как в качестве исходного сырья, так и для поддержания процесса производства. Например, при производстве аммиака природный газ является и исходным сырьем, и топливом. В некоторых других промышленных процессах энергию для поддержания производства получают непрямым способом за счет использования побочного продукта переработки исходного топлива или использования восстановителя. Примером служат отходящие газы, которые получают при производстве этилена методом парового крекинга нефти или доменный

газ из доменной печи. По этой причине в модели МЭНЭК–ЭКО к эмиссии парниковых газов от промышленных процессов относятся выбросы, обусловленные потреблением углерода только в нетопливных видах ископаемых (известняк, доломиты и др.). Примером таких процессов служит производство цемента и извести в промышленности стройматериалов, производство азотной кислоты в химической промышленности.

Вся эмиссия парниковых газов, связанная с использованием ТЭР как для технологических, так и для энергетических нужд, относится в модели к категории “Эмиссия от использования ТЭР”. В частности, в модели МЭНЭК–ЭКО к категории “Эмиссия от использования ТЭР”, а в методике МГЭИК к категории “Промышленные процессы” отнесены объемы эмиссии CO_2 , связанные с потреблением ТЭР в следующих промышленных производствах:

1) химическое производство: производство аммиака; производство карбида кремния и карбида калия;

2) металлургическое производство: производства чугуна и стали; производство ферросплавов; производство алюминия и других цветных металлов.

К категории “Эмиссия от использования ТЭР” в модели МЭНЭК–ЭКО (в отличие от методики МГЭИК) отнесена эмиссия CH_4 , связанная с потреблением ТЭР в химическом (карбида кремния и карбида калия, сажи, этилена, стирола и метанола) и металлургическом производствах (чугуна и стали).

В МЭНЭК–ЭКО к эмиссии от промышленных процессов отнесена эмиссия ПГ в промышленности, обусловленная потреблением углерода в нетопливных видах ископаемых, а именно при потреблении нетопливных ископаемых в следующих производствах:

- неметаллических минеральных продуктов (производство цемента и извести, использование известняка, производство и использование кальцинированной соды) – эмиссия CO_2 ;
- химическом (производство азотной кислоты) – эмиссия N_2O ;
- металлургическом (эмиссия прочих ПГ – перфторуглеродов и гексафторида серы).

При моделировании эмиссии ПГ в этих производствах прогнозные объемы определялись путем умножения объема выпуска соответствующей отрасли (во внутренних ценах базового года) на коэффициент эмиссии парниковых газов. Значения этих коэффициентов были определены на основе анализа ретроспективных данных об объемах эмиссии ПГ в указанных промышленных процессах при потреблении нетопливных ископаемых, приведенных в отчетах МГЭИК и Национальном докладе о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2004 гг. Принятые в модельных расчетах значения коэффициентов приведены в табл. 4.

Некоторые парниковые газы (гидрофторуглероды и гексафторид серы), которые в модели относятся к прочим ПГ, эмитируются при производстве и потреблении галогенуглеродов. В МЭНЭК–ЭКО объемы эмиссии прочих ПГ, связанные с производством и потреблением галогенуглеродов, включены в эмиссию парниковых газов от промышленных процессов, поскольку более 99% этих объемов эмиссии приходится на производство и менее 1% на потребление (аэрозольные баллоны у населения, наркоз в медицинских услугах) галогенуглеродов. Так как практически весь объем

Таблица 4. Коэффициенты эмиссии парниковых газов от промышленных процессов, млн т CO_2 экв./млрд руб. 2006 г.

Виды производств	CO_2	N_2O	Прочие GHG*
Химическое производство	–	0.003552	–
Производство прочих неметаллических минеральных продуктов	0.073960	–	–
Металлургическое производство и производство готовых металлических изделий	–	–	0.006669

* GHG (Greenhouse gases) – парниковые газы.

галогенуглеродов производится для электрооборудования (холодильные установки, кондиционеры и др.), то эмиссия прочих ПГ, связанная с производством и потреблением галогенуглеродов, в модели зависит от объема выпуска конкретного вида экономической деятельности “Производство электрооборудования, электронного и оптического оборудования” во внутренней цене базового года (2006 г.). При этом используется коэффициент эмиссии, равный 0.023541 млн т CO₂ экв./млрд руб. 2006 г. Это значение получено на основе анализа ретроспективной динамики производства в указанной отрасли и ретроспективных данных МГЭИК об эмиссии парниковых газов при производстве и потреблении галогенуглеродов в России.

При оценке летучих выбросов ПГ в результате добычи, переработки угля и других твердых видов топлива в методике МГЭИК учитываются только выбросы метана (CH₄), поскольку он является основным парниковым газом, высвобождаемым из угля при добыче и обработке. В некоторых угольных пластах может присутствовать и углекислый газ (CO₂), однако выбросы CO₂ не включаются в кадастр выбросов, поскольку данных по ним нет в наличии.

При оценке летучих выбросов метана в угледобыче учитываются следующие процессы:

- выбросы при добыче – при этом используются разные коэффициенты эмиссии для открытой и подземной (шахтной) добычи угля;
- эмиссия сопутствующего метана после добычи (при хранении и транспортировке), так как уголь, как правило, продолжает высвобождать газ даже после его добычи, хотя и более медленно, чем на этапе добычи.

Необходимо отметить, что согласно данным МГЭИК ретроспективные значения коэффициентов эмиссии метана как при добыче, так и после добычи угля менялись из года в год (табл. 5).

Таблица 5. Летучие выбросы метана при добыче угля, млн т CO₂ экв.

Источники выбросов при добыче угля	2003 г.			2004 г.			2005 г.			коэффициент в МЭНЭК–ЭКО
	добыча, млн т	коэффициент эмиссии	эмиссия, млн т CO ₂ экв.	добыча, млн т	коэффициент эмиссии	эмиссия, млн т CO ₂ экв.	добыча, млн т	коэффициент эмиссии	эмиссия, млн т CO ₂ экв.	
При добыче подземным способом	94	0.27995	26.3	100	0.30228	30.2	103	0.25827	26.6	0.27996
При добыче открытым способом	183	0.08838	16.2	182	0.08908	16.2	195	0.08772	17.1	0.08837
Эмиссия метана после добычи		0.00004	0.004		0.00004	0.004		0.00004	0.005	0.00004
Всего эмиссия			42.4			46.4			43.7	

В модели МЭНЭК–ЭКО значения коэффициентов эмиссии метана при добыче угля (подземным и открытым способами) и после добычи угля определялись делением соответствующего трехлетнего ретроспективного объема эмиссии метана на соответствующий ему трехлетний объем добычи угля (последний столбец в табл. 6).

В прогнозных расчетах объемы летучих выбросов метана в угледобыче определялись путем произведения соответствующего коэффициента эмиссии метана на стоимость добытого угля подземным или открытым способом (во внутренних ценах производителей базового года), разделенного на внутреннюю цену производителей угля в базовом году.

Таблица 6. Коэффициенты эмиссии летучих газов на объектах нефтедобычи, принятые в МЭНЭК–ЭКО, т CO₂ экв./т нефти

Объекты нефтедобычи	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Добыча нефти	0.000315	0.035498	0
Вентиляция	0.000014	0.033809	0
Сжигание отходящих испарений в факелах	0.078107	0.003366	0.000231

Летучие выбросы на нефтяных и газовых объектах являются прямым источником парниковых газов вследствие высвобождения метана и формации углекислого газа из добытой нефти и газа, когда они покидают пласт, плюс некоторое количество CO₂ и закиси азота (N₂O) от деятельности по непродуктивному сжиганию (в первую очередь попутного газа в факелах).

При моделировании в МЭНЭК–ЭКО летучих выбросов ПГ на нефтяных объектах рассматриваются выбросы только от трех процессов: добычи нефти, вентиляции и сжигании отходящих испарений в факелах на нефтяных объектах, поскольку на долю других процессов (разведка, транспортировка, распределение) приходится менее 0.001% эмиссии CO₂, менее 1.5% эмиссии CH₄ и 0% эмиссии N₂O. Все эти небольшие объемы эмиссии парниковых газов были добавлены к объемам эмиссии при добыче нефти при верификации модели. Согласно методике МГЭИК в модели МЭНЭК–ЭКО летучие выбросы ПГ при добыче нефти, вентиляции и сжигании испарений в факелах на нефтяных объектах определялись путем умножения объемов добычи нефти на соответствующие коэффициенты эмиссии различных парниковых газов.

Значения этих коэффициентов, приведенные в табл. 5, были получены путем обработки ретроспективной информации об объемах добычи нефти и информации МГЭИК о ретроспективных значениях коэффициентов эмиссии летучих газов в различных процессах на объектах нефтедобычи.

В МЭНЭК–ЭКО при моделировании летучих выбросов парниковых газов при добыче и транспортировке природного газа рассматривались выбросы только от четырех процессов: добычи природного и попутного газа, транспортировки природного газа, вентиляции и сжигания в факелах природного и попутного газа. Летучие выбросы от трех других процессов (разведка, переработка и хранение газа) ввиду их малой доли в общем объеме летучих выбросов рассматриваются в модели в качестве выбросов при добыче природного газа.

Объемы летучих выбросов при транспортировке природного газа включают выбросы при передаче газа по магистральным газопроводам и при распределении газа конечным потребителям. Указанные объемы летучих выбросов различных ПГ в модели МЭНЭК–ЭКО (как и в “Руководящих принципах” МГЭИК) зависят от общей длины газопроводной системы в России (160 тыс. км) и в прогнозных расчетах определяются путем умножения длины газопроводной системы на соответствующие коэффициенты эмиссии. Летучие выбросы ПГ от удаления природного газа (вентиляции) на газовых объектах также определяются умножением длины газопроводной системы на соответствующие коэффициенты эмиссии.

В модели МЭНЭК–ЭКО летучие выбросы парниковых газов в результате процессов добычи и сжигания в факелах природного и попутного газа определялись путем умножения объемов добычи природного и попутного газа в стране на соответствующий коэффициент эмиссии различных ПГ. Приведенные в табл. 7 коэффициенты были получены путем обработки ретроспективной информации об объемах добычи природного и попутного газа в России и информации МГЭИК относительно ретроспективных значений коэффициентов эмиссии летучих газов в процессах добычи, транспортировки, вентиляции и сжигания газа.

В МЭНЭК–ЭКО объемы эмиссии метана и закиси азота в сельском хозяйстве определяются путем умножения объемов выпуска вида экономической деятельности “Сельское и лесное хозяйство, охота” во внутренних ценах производителей базового года (последнего отчетного 2006 г.) на коэффициенты эмиссии соответствующего парникового газа. Ретроспективные значения коэффициентов эмиссии метана и закиси азота в сельском хозяйстве были определены на основе

Таблица 7. Коэффициенты эмиссии летучих газов при добыче и транспортировке природного газа, принятые в МЭНЭК–ЭКО

Источники эмиссии	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Добыча газа, т CO ₂ экв./тыс. м ³	0.000095	0.061859	0
Транспортировка газа, т CO ₂ экв./км	0.016000	99.2	0
Вентиляция, т CO ₂ экв./км	0.008500	21.0	0
Сжигание в факелах, т CO ₂ экв./тыс. м ³	0.044026	0.005552	0.000156

данных МГЭИК о выбросах указанных газов в сельском хозяйстве и данных Росстата о динамике производства по виду деятельности “Сельское и лесное хозяйство, охота” в сопоставимых ценах. Значения указанных коэффициентов, которые были использованы при верификации модели на ретроспективные данные и в прогнозных модельных расчетах, приведены в табл. 8.

Таблица 8. Коэффициенты эмиссии парниковых газов в сельском хозяйстве, млн т CO₂ экв./млрд руб. 2006 г.

Газы	Годы								
	2003	2004	2005	2006	2010	2015	2020	2025	2030
CH ₄	0.05308	0.04964	0.04613	0.04262	0.04254	0.05111	0.05282	0.05323	0.05453
N ₂ O	0.10546	0.10073	0.09588	0.09103	0.09643	0.10543	0.10723	0.10784	0.10903

В отчетах МГЭИК и Национальном докладе о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2004 гг. приводятся отчетные данные только об объемах эмиссии метана со свалок твердых отходов и выбросы метана и закиси азота при очистке сточных вод. В модели МЭНЭК–ЭКО указанные объемы выбросов парниковых газов поставлены в зависимость от динамики производства сектора “Прочие коммерческие услуги”, включающего услуги по удалению сточных вод, отходов и аналогичную деятельность (раздел О по ОКВЭД). Таким образом, в прогнозных расчетах объемы эмиссии парниковых газов, связанные с отходами, определялись производством объемов производства отрасли “Прочие коммерческие услуги” во внутренних ценах производителей базового года (последнего отчетного 2006 г.) на коэффициенты эмиссии соответствующего парникового газа.

Значения этих коэффициентов получены путем обработки ретроспективных данных Росстата о динамике производства коммерческих услуг в стране и информации МГЭИК относительно ретроспективной эмиссии ПГ, обусловленных отходами (табл. 9).

Таблица 9. Коэффициенты эмиссии парниковых газов, обусловленных отходами, млн т CO₂ экв./млрд руб. 2006 г.

Газы	Годы								
	2003	2004	2005	2006	2010	2015	2020	2025	2030
CH ₄	0.00876	0.00802	0.00740	0.00692	0.00630	0.00630	0.00630	0.00630	0.00630
N ₂ O	0.00053	0.00047	0.00043	0.00041	0.00041	0.00041	0.00041	0.00041	0.00041

В МЭНЭК–ЭКО, помимо моделирования эмиссии ПГ в экологическом блоке модели, в финансовом балансе каждой моделируемой отрасли предусмотрена возможность введения выплаты государству за эмиссию парниковых газов. Выплаты за эмиссию определяются в модели путем умножения нормы выплаты (руб. за т CO₂ экв.) на объем эмиссии ПГ, который допускает производственная отрасль.

4. ПРОЦЕДУРА И РЕЖИМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛИ

МЭНЭК–ЭКО можно считать условно динамической моделью, в которой прогнозные значения показателей определяются последовательностью взаимосвязанных статических оптимизационных расчетов. В модели МЭНЭК–ЭКО перспектива разделена на пять периодов (расчетных): 2006–2010 гг., 2010–2015 гг., 2015–2020 гг., 2020–2025 гг. и 2025–2030 гг. Динамический характер модельных расчетов на МЭНЭК–ЭКО обеспечивают аналитические связи между текущими и накопленными результатами расчетов предыдущих периодов с исходными данными для следующего года (рис. 1). В рамках этих так называемых динамических связей после каждого расчетного года значения некоторых показателей (объемов отраслевых производственных мощностей и фондов, накопленных обязательств отраслей и депозитов и др.) обновляются.

Изучение макроэкономических последствий экономических и технологических мер по снижению эмиссии парниковых газов на модели МЭНЭК–ЭКО опирается на развернутые сценарии экономического развития России, которые формируются на базовой модели МЭНЭК. В процессе формирования указанных сценариев на базовой модели МЭНЭК осуществляется проверка реальности правительственных макроэкономических прогнозов с учетом требований со стороны отраслей ТЭК, которые в наших расчетах рассматриваются как ограничения. Эти ограничения в основном касаются объемов производства и внешней торговли топливно-энергетических ресурсов, объемов инвестиций каждой из отраслей ТЭК, соответствующей этим инвестициям динамики цен энергоносителей и др. Некоторые прогнозные параметры развития экономики страны, полученные на основе базовой модели, являются сценарными (экзогенными) параметрами в расчетах на модели МЭНЭК–ЭКО. Поэтому необходимо проводить верификацию модели МЭНЭК–ЭКО не только по ретроспективным данным, но и по прогнозным параметрам, полученным в результате расчетов на базовой модели МЭНЭК. Такими параметрами для МЭНЭК–ЭКО являются: коэффициенты зависимости производственных мощностей отраслей от объемов накопленных ими инвестиций, динамика отраслевых векторов удельных затрат товаров и услуг неуглеродоемких отраслей, распределение импорта каждого продукта по направлениям их использования (промежуточное потребление, капиталовложения, конечное потребление), объемы конечного потребления продуктов населением.

В расчетах на модели МЭНЭК–ЭКО интересы производственных отраслей отождествляются с требованиями (ограничениями) по динамике их уровней рентабельности и производства. В качестве макроэкономических ограничений при поиске решений могут приниматься правительственные ожидания относительно темпов роста ВВП, реальных доходов населения и других макроэкономических показателей. Экологические ограничения могут быть представлены

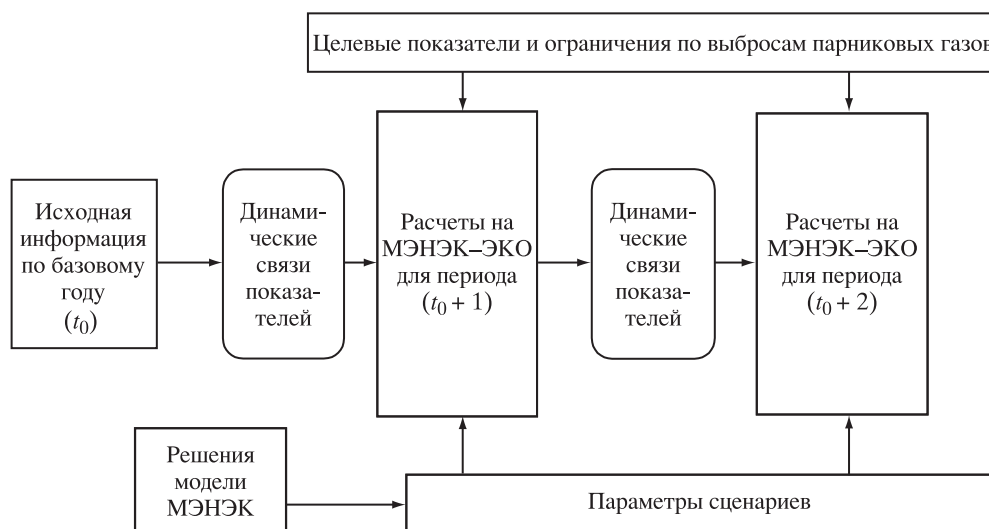


Рис. 1. Схема организации прогнозных динамических расчетов на МЭНЭК–ЭКО

ограничениями на эмиссию ПГ как в экономике в целом, так и в ее отдельных секторах. Все перечисленные требования к искомому решению и составляют группу так называемых целевых ограничений модели.

Использование в МЭНЭК–ЭКО целевых ограничений нередко приводит к отсутствию допустимых решений, т.е. решений, в которых значения всех зависимых показателей и независимых переменных входят в заданные границы. Поэтому работа над каждым прогнозным периодом начинается с формирования любого допустимого решения. Для его поиска используются оптимизационные процедуры, которые обеспечивают упорядоченное варьирование переменных, но не параметров или целевых установок. В частности, в модели используется следующий подход. Во все ограничения модели (как равенства, так и неравенства) вводится дополнительная неограниченная сверху неотрицательная переменная (c) так, чтобы облегчить их выполнение. Это гарантирует наличие решений у соответствующей задачи математического программирования, в которой минимизируется значение c . Если $\min c = 0$, то полученное решение является допустимым для исходной задачи и можно переходить к поиску оптимального решения уже по любому содержательному критерию. Если же $\min c > 0$, приходится прибегать к итеративному эвристическому поиску такого минимального ослабления целевых ограничений (т.е. коррекции параметров задачи), в результате которого появится допустимое решение (рис. 2).

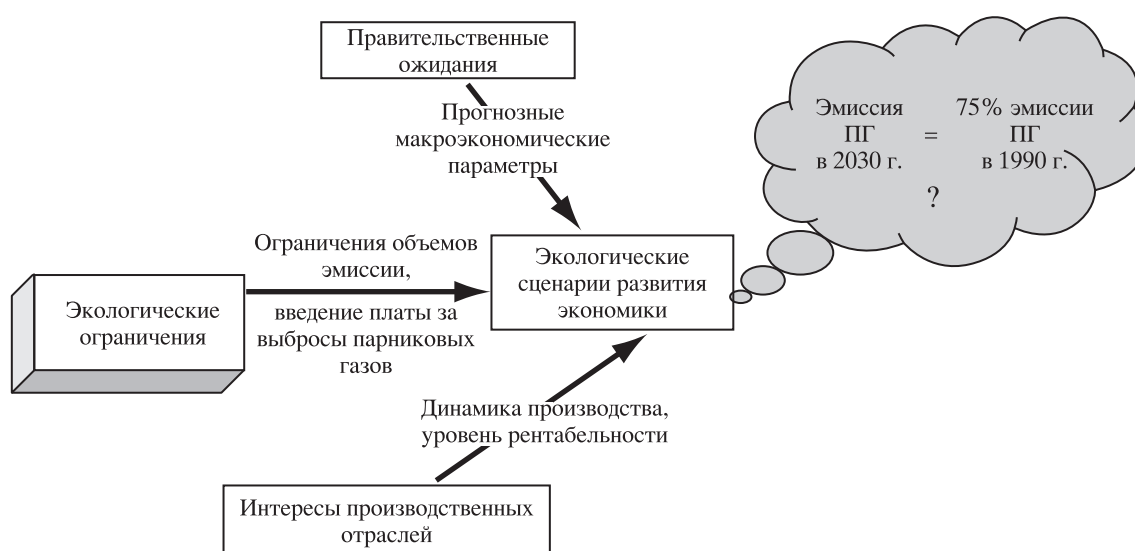


Рис. 2. Поиск решения на модели МЭНЭК–ЭКО

Таким образом, модель МЭНЭК–ЭКО ориентирована на поиск параметров и условий экономической совместимости и реализуемости заданного макроэкономического сценария с различными мерами, связанными с ограничениями эмиссии ПГ.

В модельных расчетах после нахождения допустимого решения осуществляется поиск оптимального решения по критерию максимизации суммы ВВП, доходов населения и инвестиций в основной капитал в экономике в сопоставимых ценах.

Использование оптимизационного режима приводит к необходимости решения задач математического программирования. В наибольшей мере распространены и изучены прикладные задачи, сводящиеся к задачам линейного программирования. Однако в МЭНЭК–ЭКО неизбежно возникает необходимость решения задач, в которых целевая функция и функции ограничений могут быть полилинейными. В подобных задачах целевая функция и ограничения представлены полилинейными функциями, которые являются многочленами с мономами, содержащими произведения переменных в первой степени, т.е. эти функции являются линейными по каждой переменной при фиксации остальных переменных. Например, выручка отрасли от продажи продукта на внутреннем рынке зависит от объема его производства отраслью и индекса соответствующего

щей цены. Для решения полилинейных задач был специально разработан обобщенный метод полилинейного программирования (метод релаксаций) (Шапот, Лукацкий, 2002, с. 680–691), который прошел многолетнюю апробацию в наших исследованиях. Метод поиска допустимых и оптимальных решений для полилинейных задач сводится к последовательным фазам, в каждой из которых строится и решается задача линейного программирования, порожденная (из полилинейной задачи) фиксацией некоторого подмножества переменных. Фиксация выполняется таким образом, что по нефиксированным (активным) независимым переменным исходная задача является линейной. Для каждой последующей фазы исходной точкой выступает решение задачи линейного программирования предыдущей фазы.

Необходимо отметить, что полилинейные функции вообще не обязательно выпуклы. Если функция f полилинейна, то критерий выпуклости $\forall x \forall y \partial^2 f / \partial x \partial y \geq 0$. В общем случае допустимые области полилинейного программирования невыпуклы, причем локальные максимумы полилинейных функций при полилинейных ограничениях не обязательно являются глобальными. Полилинейное программирование гарантирует для исходной допустимой задачи неубывание целевой функции и принадлежность найденного решения границе допустимой области, но нет гарантии того, что найденное решение оптимально: при данном методе и данном составе фаз оно является лишь неувлучшаемым. В общем случае найденное решение, в отличие задач выпуклого программирования, зависит от исходной точки.

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛИ

На основе отчетных данных Росстата о динамике производства видов экономической деятельности в стране и данных ИНЭИ РАН, касающихся объемов потребления различных видов топлива (газ, уголь, мазут, моторное топливо и пр.) в различных секторах экономики, была проведена верификация экологического блока модели МЭНЭК–ЭКО. В результате сформирована информационная база данных по выбросам ПГ по видам экономической деятельности и структуре источников эмиссии, принятой в модели. В ходе верификации экологического блока результаты расчетов на модели МЭНЭК–ЭКО по ретроспективным годам сравнивались с ретроспективными данными об объемах и структуре эмиссии парниковых газов в России, приведенными в отчетах МГЭИК, Национальном докладе о кадастре антропогенных выбросов парниковых газов в России (Охрана окружающей среды в России, 2006). Результаты верификации приводятся в табл. 10–12.

Выше уже говорилось, что объемы эмиссии ПГ в промышленных процессах определяются в модели путем умножения объема выпуска соответствующей отрасли (во внутренних ценах базового года) на коэффициенты эмиссии ПГ. Указанные коэффициенты определялись по данным МГЭИК относительно эмиссии парниковых газов в соответствующих производствах, т.е. путем деления этих объемов эмиссии на ретроспективные объемы производства в соответствующей отрасли (во внутренних ценах базового года). По этой причине расчетные объемы эмиссии ПГ в промышленных процессах, связанных с потреблением только нетопливных видов ископаемых, полностью совпадают с данными МГЭИК (см. табл. 10–12).

Аналогичная картина и с эмиссией парниковых газов, обусловленной сельскохозяйственным производством, производством и потреблением галогенуглеродов и гексафторида серы, промышленными и коммунально-бытовыми отходами, – расчетные объемы эмиссии парниковых газов от этих источников полностью совпадают с данными МГЭИК.

Основные различия между модельными верификационными расчетами и данными МГЭИК приходятся на объемы эмиссии газов от использования ТЭР. Эти различия связаны с тем, что согласно методике МГЭИК эмиссия углекислого газа и метана при потреблении топливных ископаемых в химии и металлургии относится к выбросам от промышленных процессов. В модели МЭНЭК–ЭКО эти выбросы относятся к категории эмиссии от использования ТЭР. Если учесть указанное отличие в трактовке структуры выбросов парниковых газов, то разница между модельными расчетами и данными МГЭИК относительно эмиссии всех рассматриваемых парниковых газов в результате использования ТЭР в 2003–2005 гг. не превышает 1.4%.

Таблица 10. Результаты верификации МЭНЭК–ЭКО по выбросам CO₂, млн т CO₂ экв.

Источники выбросов	2003 г.				2004 г.				2005 г.	
	Росстат*	IPCC**	Нац. доклад***	МЭНЭК–ЭКО	Росстат*	IPCC**	Нац. доклад***	МЭНЭК–ЭКО	IPCC**	МЭНЭК–ЭКО
Эмиссия от использования ТЭР и дров	1540.0	1480.1	1486.8	1570.6	1540.9	1483.1	1492.1	1567.3	1530.3	1609.6
Утечки при добыче и транспортировке нефти, газа и угля	20.7	55.3	55.3	59.6	24.3	62.7	24.0	63.7	63.9	65.2
Промышленные процессы, всего	46.5	144.9	154.2	44.7	50.6	152.3	159.7	45.9	150.0	47.9
Химическое производство		17.1	17.1			18.4	18.4		19.0	
Металлургическое производство		83.0	92.3			88.0	95.4		83.0	
Производство неметаллических минеральных продуктов		44.7	44.7	44.7		45.9	45.9	45.9	47.9	47.9
Выбросы, всего****	1607.3	1680.2	1696.2	1674.9	1615.8	1698.1	1675.8	1676.9	1744.1	1722.8

* (Охрана окружающей среды в России, 2006).

** IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) – доклады МГЭИК за 2004–2006 гг. по РФ.

*** Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2004 гг.

**** Без учета выбросов при землепользовании, изменениях землепользования и в лесном хозяйстве.

Таблица 11. Результаты верификации МЭНЭК–ЭКО по выбросам CH₄, млн т CO₂ экв.

Источники выбросов	2003 г.				2004 г.				2005 г.	
	Росстат*	IPCC**	Нац. доклад**	МЭНЭК–ЭКО	Росстат*	IPCC**	Нац. доклад***	МЭНЭК–ЭКО	IPCC**	МЭНЭК–ЭКО
Эмиссия от использования ТЭР и дров	2.7	3.8	3.8	4.1	2.7	3.6	3.6	4.2	3.2	4.1
Утечки при добыче и транспортировке нефти, газа и угля	177.9	133.4	137.1	132.5	182.7	139.4	139.4	140.9	138.3	140.3
Промышленные процессы, всего	0.8	0.7	0.7	0.0	0.9	0.7	0.7	0.0	0.7	0.0
Химическое производство		0.4	0.3			0.4	0.4		0.4	
Металлургическое производство		0.3	0.3			0.4	0.4		0.3	

Окончание табл. 11

Источники выбросов	2003 г.				2004 г.				2005 г.	
	Росстат*	IPCC**	Нац. доклад**	МЭНЭК–ЭКО	Росстат*	IPCC**	Нац. доклад***	МЭНЭК–ЭКО	IPCC**	МЭНЭК–ЭКО
Сельское хозяйство		47.9	47.9	47.9		46.2	50.0	46.2	43.9	43.9
Отходы		63.4	58.5	63.4		65.2	60.5	65.2	66.9	66.9
Выбросы, всего****	181.4	249.1	248.0	247.8	186.3	255.2	254.3	256.4	253.1	255.1

* (Охрана окружающей среды в России, 2006).

** IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) – доклады МГЭИК за 2004–2006 гг. по РФ.

*** Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2004 гг.

**** Без учета выбросов при землепользовании, изменениях землепользования и в лесном хозяйстве.

Таблица 12. Результаты верификации МЭНЭК–ЭКО по выбросам N₂O, млн т CO₂ экв.

Источники выбросов	2003 г.				2004 г.				2005 г.	
	Росстат*	IPCC**	Нац. доклад***	МЭНЭК–ЭКО	Росстат*	IPCC**	Нац. доклад***	МЭНЭК–ЭКО	IPCC**	МЭНЭК–ЭКО
Эмиссия от использования ТЭР и дров	3.7	3.2	3.2	3.8	3.7	3.2	3.2	3.7	3.1	3.6
Утечки при добыче и транспортировке нефти, газа и угля	4.2	0.2	0.2	0.2	4.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Промышленные процессы, всего	5.0	3.2	3.2	3.2	5.5	3.4	3.4	3.4	3.1	3.1
Химическое производство		3.2	3.2	3.2		3.4	3.4	3.4	3.1	3.1
Сельское хозяйство		95.2	92.3	95.2		93.7	93.7	93.7	91.2	91.2
Отходы		3.8	3.8	3.8		3.8	3.8	3.8	3.9	3.9
Выбросы, всего****	12.9	105.6	102.7	106.2	13.3	104.3	104.3	104.8	101.6	102.1

* (Охрана окружающей среды в России, 2006).

** IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) – доклады МГЭИК за 2004–2006 гг. по РФ.

*** Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2004 гг.

**** Без учета выбросов при землепользовании, изменениях землепользования и в лесном хозяйстве.

Эта разница обусловлена различиями между данными МГЭИК и ИНЭИ РАН относительно объемов и структуры потребления топлива в стране.

Аналогичная картина наблюдается по суммарному объему эмиссии парниковых газов в России: в 2003–2005 гг. расчеты на модели показали очень хорошее совпадение с внешними данными (разница менее 1%).

Для апробации построенной модели МЭНЭК–ЭКО и демонстрации ее возможностей были проведены расчеты по сценарию развития экономики на период до 2030 г., которые подразумевали верификацию МЭНЭК–ЭКО на прогнозные параметры, полученные в результате расчетов на базовой модели МЭНЭК по *инновационному сценарию* экономического развития, разработанному Министерством экономического развития РФ в августе 2008 г.

Фактически целью расчетов на модели МЭНЭК–ЭКО было определение динамики выбросов ПГ на период до 2030 г. как в целом по экономике России, так и по видам деятельности на основе указанного правительственного сценария социально-экономического развития страны (без ограничения на выбросы). Основные макроэкономические результаты модельных расчетов приводятся в табл. 13.

Таблица 13. Основные макроэкономические результаты расчетов

Показатели	Среднегодовые темпы роста, %			
	2010 г.	2015–2010 гг.	2020–2015 гг.	2030–2020 гг.
ВВП	6.6	6.3	6.4	5.2
Валовый выпуск	6.6	6.6	6.7	5.2
Промежуточное потребление	6.5	6.4	6.5	4.9
Инвестиции в основной капитал	13.3	10.3	10.0	6.1
Доходы населения	9.1	7.1	6.7	5.6
Промышленное производство	5.5	5.3	5.1	4.3
Потребительские цены	7.5	6.4	2.8	2.6
	2010 г.	2015 г.	2020 г.	2030 г.
Экспорт товаров и услуг, млрд долл.	562.7	742.1	1099.2	2388.3
Импорт товаров и услуг, млрд долл.	528.9	820.6	1236.7	2312.2
Чистый экспорт, млрд долл.	33.8	–78.4	–137.5	76.2
Чистый вывоз капитала за границу, млрд долл.	10.3	–91.9	–170.5	–214.7
Численность занятых в экономике, млн чел.	68.3	66.1	63.7	62.6

В рассматриваемом сценарии в 2030 г. ВВП в реальном выражении вырастает относительно уровня 2006 г. почти в 4.1 раза. При этом суммарные инвестиции в основной капитал в экономике вырастают за тот же период в сопоставимых ценах почти в 5.4 раза. В результате опережающего роста инвестиций электроёмкость экономики снижается достаточно высокими темпами на всем прогнозном периоде (табл. 14).

В результате расчетов суммарный объем эмиссии всех парниковых газов от всех источников в 2020 г. вырастает в 1.48 раза (до 3215.9 млн т CO₂ экв.) относительно уровня 2006 г. (2173.4 млн т CO₂ экв.), суммарные объемы эмиссии CO₂ при этом возрастают в 1.4 раза (до 2479 – против 1774.1 млн т). В 2030 г. суммарный объем выбросов всех ПГ составил 3922.4 млн т CO₂ экв. (рост в 1.8 раза по сравнению с 2006 г.), из них на CO₂ приходится 2961.9 млн т (рост в 1.67 раза по сравнению с 2006 г.).

Таблица 14. Динамика электроемкости ВВП

Показатели	Годы				
	2006	2010	2015	2020	2030
Электропотребление, млрд кВт · ч	980.0	1124.0	1355.4	1635.2	2200.3
Электроемкость ВВП, % к 2006 г.	100.0	86.6	76.9	68.0	55.0

При этом эмиссия ПГ в результате использования ТЭР увеличилась, но в меньшей степени: по всем парниковым газам и отдельно по CO₂ рост составил менее 35% в 2020 г. и чуть более 53% в 2030 г. (до 2494.9 и 2485.9 млн т CO₂ экв., соответственно) (табл. 15).

Таблица 15. Расчетные объемы эмиссии парниковых газов, млн т CO₂ экв.

Показатели эмиссии	Годы				
	2006	2010	2015	2020	2030
Эмиссия парниковых газов, всего	2173.4	2420.4	2816.3	3215.9	3922.4
CO ₂	1774.1	1948.8	2212.9	2479.0	2961.9
CH ₄	263.6	306.6	384.7	463.0	587.6
N ₂ O	101.3	123.8	161.6	197.4	260.1
Прочие GHG	34.4	41.2	57.0	76.5	112.8
Эмиссия парниковых газов от использования ТЭР	1626.4	1773.8	1987.2	2189.8	2494.9
CO ₂	1620.3	1767.6	1980.3	2182.1	2485.9
CH ₄	2.7	2.3	2.6	2.8	3.2
N ₂ O	3.3	3.8	4.3	4.9	5.8

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

До недавнего времени в России не уделялось большого внимания вопросам загрязнения окружающей среды и, в частности, проблеме выбросов парниковых газов (ПГ) в атмосферу. Этому были свои объективные причины, главным образом связанные со структурными политическими изменениями в стране и спадом ее экономики в 1990-е годы. Однако в силу возрастающей политической актуальности экологических вопросов в системе международных отношений нашей страны по мере преодоления экономической отсталости и наращивания производства скорее всего придется учитывать различные экономические последствия возможных ограничений на количество антропогенных выбросов ПГ. Для оценки этих последствий следует разработать соответствующий инструмент, включающий методику, информационную базу данных и экономико-математические модели.

В качестве элемента этого инструмента в ИНЭИ РАН была построена межотраслевая модель для исследования макроэкономических последствий сценариев ограничения эмиссии парниковых газов (МЭНЭК–ЭКО). Эмиссия ПГ моделируется при использовании видов топлива в различных секторах экономики, летучих выбросов в отраслях ТЭК и эмиссии парниковых газов в промышленных процессах углеродоемких отраслей. За основу моделирования антропогенных выбросов ПГ была взята методика Межгосударственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). В частности, объемы выбросов ПГ, связанных с использованием топлива, зависят в модели от объемов потребления различных топливно-энергетических ресурсов. При этом используются как национальные коэффициенты эмиссии ПГ, так и коэффициенты, рекомендованные МГЭИК. При проведении верификации модели на отчетные ретроспективные данные была

сформирована информационная база данных по выбросам ПГ по видам экономической деятельности и структуре источников эмиссии, принятой в модели.

Для апробации построенной модели МЭНЭК–ЭКО и демонстрации ее возможностей были проведены расчеты в рамках инновационного сценария экономического развития, разработанного Министерством экономического развития РФ в августе 2008 г. Модельные расчеты показали, что в этом сценарии при отсутствии мер по ограничению эмиссии ПГ (например, введения платы за выбросы ПГ) ВВП в реальном выражении вырастает в 2030 г. относительно уровня 2006 г. почти в 4.1 раза. При этом суммарный объем эмиссии всех ПГ из всех источников за тот же период вырастает на 80%, а суммарный объем эмиссии CO₂ – на 67%.

В заключение следует сказать, что использование построенной модели будет способствовать оценке обоснованности государственных решений, касающихся принятия обязательств по ограничению эмиссии ПГ в России на долгосрочную перспективу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Макаров А.А., Шапот Д.В., Лукацкий А.М., Малахов В.А.** (2002): Инструментальные средства для количественного исследования взаимосвязи энергетики и экономики // *Экономика и мат. методы*. Т. 38. № 1.
- Охрана окружающей среды в России (2006): Охрана окружающей среды в России: Статистический сборник. М.: Росстат.
- Руководящие принципы (2006): Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов. М.: МГЭИК.
- Шапот Д.В., Лукацкий А.М.** (2002): Методы решения задач полилинейного программирования // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. Т. 41. № 5.
- Department of Trade and Industry (2005): Options for a Low Carbon Future: Review of Modeling Activities and an Update. DTI Occasional Paper № 1. London.
- Electric Power Research Institute (2008): Workshop on Understanding Cost Estimates of Climate Policy // *EPRI Journal*.
- Stern N.** (2006): The Stern Review on the Economics of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

Поступила в редакцию
18.05.2009 г.

Model of the Macroeconomic Consequence of Greenhouse Gases Emissions Limitations

V.A. Malakhov, T.G. Dubynina

The authors describe the nonlinear optimization inter-branch model of the macroeconomic consequences of different limitations of the greenhouse gases emissions in Russia. Considered the emission of greenhouse gases in different sectors, fluid emissions in power sector and emissions in carbo-consuming industries. Described the results of the model calculations based on the economic development scenarios of the Russian Ministry of Economic Development in 2008.

Key words: non-linear optimization, industrial model, greenhouse gases, emission, carbonconsuming industries, economic development scenario 2008.