

Д.В. Ковалевский**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «МИРОВАЯ ЭКОНОМИКА – ГЛОБАЛЬНЫЙ КЛИМАТ» В РАМКАХ ОПТИМИЗАЦИОННОГО И СИСТЕМНО-ДИНАМИЧЕСКОГО ПОДХОДОВ****D.V. Kovalevsky****MODELLING THE «GLOBAL ECONOMY – GLOBAL CLIMATE» SYSTEM USING THE OPTIMIZATION AND SYSTEM-DYNAMIC APPROACHES**

Экономико-климатические модели (в том числе, модели совокупной оценки) являются важным инструментом экономики изменений климата. Рассмотрены оптимизационный и системно-динамический подходы к экономико-климатическому моделированию. Первый подход, наиболее распространенный в настоящее время, предполагает формулировку соответствующей модели как задачи динамической оптимизации, второй подход сводится к интегрированию некоторой динамической системы (как правило, численному). Предложена динамическая модель системы «мировая экономика – глобальный климат» с тремя переменными состояния: капитал, карбоноёмкость мировой экономики, превышение средней глобальной температуры приземного воздуха над своим доиндустриальным уровнем (температура). В модели возможно эндогенное снижение карбоноёмкости. Норма износа капитала также эндогенна (растет с ростом температуры). Выполнены сценарные численные расчеты по данной модели совокупной оценки в условиях как отсутствия (базовый сценарий), так и наличия скоординированных мер по смягчению климатических изменений. Для ряда неоптимальных решений оценена дисконтированная полезность потребления. Показано, что в отличие от формально оптимального решения, соответствующего базовому сценарию при отсутствии климатической политики, решения с незначительным снижением полезности, обусловленным умеренными инвестициями в эндогенное снижение карбоноёмкости мировой экономики, могут оказаться весьма эффективными с точки зрения смягчения антропогенного воздействия на климат. Выполненный анализ служит аргументом в пользу того, что в ряде случаев «умеренно неоптимальные» сценарии могут на практике оказаться предпочтительнее оптимальных (формально наилучших). Сделан вывод о перспективности применения системно-динамических моделей в экономике изменений климата.

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА; МОДЕЛЬ СОВОКУПНОЙ ОЦЕНКИ; ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РОСТ; ДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ; СИСТЕМНАЯ ДИНАМИКА.

Climate-economy models (particularly, Integrated Assessment models) are important tools in economics of climate change. We have analyzed the optimization and system-dynamic approaches to climate-economy modelling. The first approach, currently the most widespread, implies defining the relevant model as a dynamic optimization problem, while the second one can ultimately be reduced to (usually numerical) integration of some dynamic system. We have proposed a dynamic model of the «global economy – global climate» system with three state variables: capital, global carbon intensity, and global mean surface air temperature increase above the pre-industrial level (temperature). The model allows for the regimes of endogenous carbon intensity reduction. The capital depreciation rate is endogenous as well, increasing with temperature. We have performed numeric simulations with this Integrated Assessment model under «business-as-usual» scenario, and under conditions of globally coordinated mitigation policies. We have evaluated the discounted utility of consumption for several non-optimal solutions. Simulation results suggest that, as opposed to the formally optimal solution corresponding to the «business-as-usual» scenario with no climate policy, solutions with minor utility reduction caused by moderate investment in endogenous global carbon intensity reduction might be quite efficient in achieving mitigation targets.

The analysis performed provides an argument supporting «moderately suboptimal» solutions as a viable alternative to formally «first-best» optimal solutions in certain real-world situations. We conclude with a corollary about the good prospects for applying system-dynamic models in economics of climate change.

CLIMATE CHANGE; INTEGRATED ASSESSMENT MODEL; ECONOMIC GROWTH; DYNAMIC OPTIMIZATION; SYSTEM DYNAMICS.

Введение. Экономика изменений климата в настоящее время – бурно развивающаяся область экономики природопользования [8–9, 11–13, 23]. Экономико-климатические модели совокупной оценки (Integrated Assessment models, IAMs) достигли высокой степени детализации описания системы «мировая экономика – глобальный климат»: многие из них дезагрегированы территориально (мир разбит на ключевые макрорегионы) и секторально (рассматривается несколько секторов экономики). Кроме того, часто в подобных моделях с большой степенью детальности представлен топливно-энергетический комплекс, включая различные невозобновляемые и возобновляемые источники энергии [16, 21].

Большинство существующих моделей совокупной оценки разработано в рамках оптимизационной парадигмы, сводящейся, как правило, к максимизации дисконтированной полезности одного из экономических агентов модели, например, агрегированного домохозяйства, и предполагающей абсолютно рациональное поведение экономических агентов, полное знание ими всех социально-экономических механизмов на качественном и количественном уровне и неограниченный горизонт планирования. Все эти базовые предположения в последнее время подвергаются сомнению разработчиками альтернативных подходов к моделированию социально-экономических систем, число которых постоянно растет [3, 15].

По-видимому, наиболее вероятным «преемником» устоявшихся в традиционной экономической теории подходов может стать агент-ориентированное моделирование (agent-based modeling, ABM) [2, 7, 15]. Другим подходом, играющим важную роль в эколого-экономическом моделировании начиная с 1970-х гг., но за прошедшие десятилетия снискавшим лишь ограниченное признание в лагере сторонников мейнстримных экономических теорий, является системная динамика (system dynamics), восходящая к пионерным работам Дж. Форрестера [14] и к

знаменитым «Пределам роста» Д. Медоуз с соавторами [10].

Актор-ориентированный системно-динамический подход к моделированию экономико-климатической динамики [17–18, 24] может рассматриваться, с одной стороны, как особая разновидность агент-ориентированного моделирования, с другой – как дальнейшее развитие традиционной системной динамики. Данный подход привносит в моделирование социально-экономических систем подходы, характерные для естественных наук. При этом социально-экономическая система моделируется как совокупность небольшого числа агрегированных акторов (фирма, домохозяйство, центральный банк, правительство и др.), каждый из которых преследует собственные цели (зачастую противоречащие целям других акторов). В условиях конфликта интересов акторы руководствуются формализованными управляющими стратегиями. Фактически, каждый актор стремится оптимизировать состояние социально-экономической системы в условиях неполной информации и ограниченной рациональности, однако термин «оптимизация» понимается здесь в нестрогом смысле и не предполагает явной максимизации каких-либо целевых функций. Математическая модель при этом сводится к модели сложной нелинейной динамической системы. От традиционного системно-динамического подхода актор-ориентированный системно-динамический подход отличает, прежде всего, вышеописанная концепция конфликта интересов акторов, а также более сложная форма параметризации управляющих стратегий (предполагающая решение динамических уравнений для управляющих переменных вместо использования фиксированных управляющих параметров). Главное же отличие от агент-ориентированного моделирования – малое число агрегированных акторов, которые описываются экономической системой (в отличие от зачастую огромного числа индивидуальных агентов в агент-ориентированных моделях [15]).

Методика и результаты исследования. Итак, всегда ли нежелательна неоптимальность? Пусть некоторая модель экономической (или экономико-климатической) динамики имеет форму системы (чаще всего нелинейной) обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), к которой для нахождения закона изменения управляющих переменных во времени надо применить тот или иной метод динамической оптимизации (для более простых теоретических моделей – принцип максимума Понтрягина, для более сложных систем – численные методы оптимизации). В принципе, возможно разработать и системно-динамические версии данной модели, в которых динамика управляющих переменных будет задана в форме различных управляющих стратегий, формализуемых, как правило, также в виде ОДУ. Решения системно-динамических версий модели будут, вообще говоря, отличаться от оптимального решения оптимизационной версии и, следовательно, будут неоптимальными. Но «насколько неоптимальными» они будут и всегда ли нежелательна неоптимальность?

При количественном сопоставлении оптимизационных и системно-динамических решений несложно рассчитать «степень субоптимальности» последних [5]. Идея подхода заключается в том, что на решениях системно-динамической версии численно рассчитывается значение той же целевой функции (например, полезности домохозяйств), которая максимизировалась в оптимизационной версии: расхождения в значениях целевых функций и составляют количественную характеристику субоптимальности системно-динамического решения. Если по результатам расчетов субоптимальному и оптимальному решениям будут соответствовать достаточно близкие значения целевой функции, то с учетом ряда дополнительных соображений, выходящих за формальные рамки рассматриваемой экономической (экономико-климатической) модели, но могущих стать важными для принятия решений в реальном мире (например, при разработке конкретных мер климатической политики), неоптимальное решение может на практике оказаться предпочтительнее оптимального.

Далее приведем простую иллюстрацию данного тезиса на примере несложной экономико-климатической модели.

Экономико-климатическая модель с эндогенной нормой износа капитала

Уравнения модели. В [4] на основе стандартной АК-модели экономического роста [1], в которой предполагается пропорциональность производственной функции капиталу (рис. 1),

$$Y(t) = AK(t), \quad (1)$$

где $Y(t)$ – выпуск экономики, A – технологический параметр производственной функции, $K(t)$ – капитал (в данном контексте обычно трактуемый расширительно, как совокупность физического и человеческого капитала), предложена простая экономико-климатическая модель с эндогенной нормой износа капитала, растущей с ростом средней глобальной температуры приземного воздуха. В данном случае за основу взята указанная модель, но сделаны две важных модификации. Первая из них носит технический характер и заключается в некотором упрощении климатического модуля исходной модели. Вторая – более существенна: если в цитированной работе рассматривался лишь базовый сценарий («business-as-usual») при отсутствии мер по смягчению изменений климата, то здесь будут моделироваться последствия целенаправленной климатической политики, скоординированной на глобальном уровне.

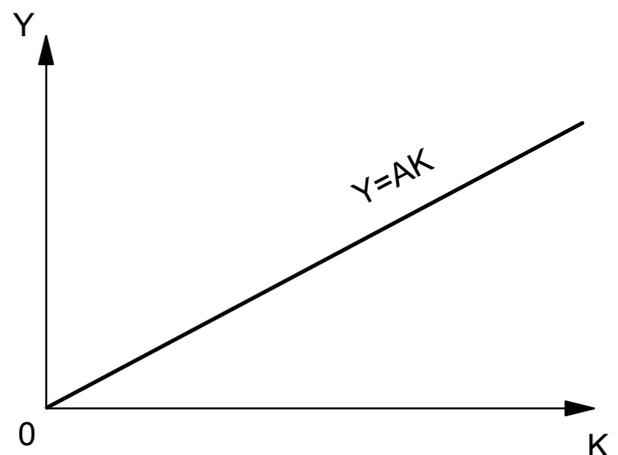


Рис. 1. Графическая форма производственной функции в АК-модели экономического роста (выпуск Y пропорционален капиталу K)

Итак, рассмотрим модель совокупной оценки, описываемую системой трех ОДУ для следующих переменных состояния: капитал $K(t)$, карбоноёмкость мировой экономики $\eta(t)$, превышение средней глобальной температуры приземного воздуха над своим доиндустриальным уровнем (далее по тексту – температура) $T(t)$:

$$\dot{K} = [(1 - \sigma(t))sA - \delta_0(1 + \varepsilon(T - T_0))]K; \quad (2)$$

$$\dot{\eta} = \begin{cases} -\beta_0\sigma(t)sAK, & \eta > 0, \\ 0, & \eta = 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$\dot{T} = \xi\eta AK - \lambda_T T. \quad (4)$$

В уравнениях (2)–(4) $\sigma(t)$ – доля выпуска мировой экономики, направляемая на инвестиции в эндогенное снижение карбоноёмкости ($0 \leq \sigma(t) \leq 1$); s – норма сбережения; δ_0 – значение нормы износа капитала при температуре T_0 ; ε – чувствительность нормы износа капитала к росту температуры; β_0 – эффективность инвестиций в эндогенное снижение карбоноёмкости; ξ – чувствительность климатической системы к выбросам парниковых газов; λ_T – время релаксации климатической системы.

Поясним динамическую систему уравнений модели (2)–(4).

Если положить в уравнении (2) $\sigma(t) = 0$, $\varepsilon = 0$, приходим к стандартной АК-модели [1], воспроизводящей строго экспоненциальный рост экономики (см. ниже формулу (6)). При положительном $\sigma(t)$ часть выпуска $Y = AK$, помимо потребления и «традиционных» инвестиций в физический капитал $K(t)$, идет в «зеленые» инвестиции, направленные на эндогенное снижение карбоноёмкости экономики; доля указанных «зеленых» инвестиций в общем объеме инвестиций равна $\sigma(t)$. Норма износа капитала в стандартной АК-модели предполагаемая постоянной, в нашей модели – линейно растет с ростом температуры $T(t)$ (параметризуемой в предложенном подходе текущее состояние климатической системы). Подобная зависимость нормы износа капитала от температуры параметризует неблагоприятные последствия антропогенно обусловленных изменений климата для капитала (в особенности, для его инфраструктурной составляющей).

Уравнение (3) подразумевает, что скорость эндогенного снижения карбоноёмкости пропорциональна вышеупомянутым «зеленым» инвестициям $\sigma(t)sAK$ с коэффициентом эффективности β_0 , см. первое из уравнений (3). Вместе с тем инвестировать в снижение карбоноёмкости необходимо лишь до достижения состояния полной декарбонизации экономики $\eta = 0$, после чего потребность в «зеленых» инвестициях отпадает, см. второе из уравнений (3).

Наконец, уравнение (4) – это упрощенная модель глобальной климатической динамики. Предполагается, что температура растет с ростом выбросов парниковых газов (ПГ), равных произведению карбоноёмкости экономики $\eta(t)$ на выпуск $Y(t) = AK(t)$. Однако при гипотетическом прекращении выбросов ПГ (полная декарбонизация экономики) температура постепенно релаксирует к своему доиндустриальному уровню.

Отметим, что уравнение (2) может быть также записано в виде

$$\dot{K} = [r_0 - \delta_0\varepsilon(T - T_0) - \sigma(t)sA]K, \quad (5)$$

где $r_0 = sA - \delta_0$ (6)

– базовый темп роста экономики в стандартной АК-модели (при отсутствии как мер по смягчению изменений климата, так и самих климатических изменений).

Для решения задачи (2)–(4), или, что эквивалентно, (3)–(5), в оптимизационной постановке необходимо определить тем или иным способом целевую функцию. Стандартным подходом в теории экономического роста является максимизация полезности путем применения методов динамической оптимизации. Потребление в рассматриваемой модели

$$C = (1 - s)AK, \quad (7)$$

поэтому, вводя функцию полезности в общем виде $u(C)$, можем записать дисконтированную полезность в виде

$$U = \int_0^{\infty} u(C) \exp(-\rho t) dt, \quad (8)$$

где ρ – норма дисконтирования (принимаемая ниже в численных расчетах равной $0,05 \text{ год}^{-1}$). Задавая для определенности функцию полезности в логарифмической форме,

$$u(C) = \ln C, \quad (9)$$

и замечая, что под знаком логарифма должна стоять безразмерная величина, перепишем соотношение (8) в виде

$$U = \bar{U} + \text{const}, \quad (10)$$

где константа (const) не зависит от закона изменения управляющей переменной $\sigma(t)$, а компонент полезности

$$\bar{U} = \int_0^{\infty} \ln(K(t)/K_0) \exp(-\rho t) dt \quad (11)$$

неявно зависит от $\sigma(t)$, поскольку динамика $K(t)$ определяется зависимостью от времени $\sigma(t)$.

Отметим, что, согласно формуле (11) полезность \bar{U} имеет размерность времени, тогда как в экономической теории полезность принято измерять в специальных условных единицах («утилях»). Данное обстоятельство несущественно для последующих рассуждений, и приводя далее в табл. 1 численные оценки полезности, мы избегаем указания для нее единиц измерения.

Значения параметров модели. Базовый сценарий. Расчеты велись для следующих значений параметров модели: $s = 0,225$; $A = 0,4 \text{ год}^{-1}$; $\delta_0 = 0,05 \text{ год}^{-1}$; $\varepsilon = 0,2 \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$; $\beta_0 = 0,002 \text{ Гт CO}_2/(\text{трлн USD})^2$; $\xi = 0,001 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Гт CO}_2$; $\lambda_T = 0,01 \text{ год}^{-1}$. В качестве начальных условий выбраны: $K_0 = 150 \text{ трлн USD}$; $\eta_0 = 0,5 \text{ Гт CO}_2/\text{трлн USD}$, $T_0 = 0,85 \text{ }^\circ\text{C}$ [19].

Отметим, что начало отсчета времени соответствует 2010 г., и под монетарной единицей измерения (USD) понимаются доллары США 2010 г.

Базовый сценарий предполагает отсутствие мер по смягчению изменений климата, иными словами, $\sigma(t) = 0$ в каждый момент времени. Как следует из уравнения (3), при этом карбоноёмкость остается постоянной: $\eta(t) = \eta_0$. «Пределы роста» обуславливают в данном случае стремление как капитала, так и температуры к своим асимптотическим значениям K_∞ , T_∞ . Из уравнения (5) несложно усмотреть, что

$$T_\infty = T_0 + \frac{r_0}{\delta_0 \varepsilon}; \quad (12)$$

тогда из уравнения (4) немедленно получаем:

$$K_\infty = \frac{\lambda_T}{\xi \eta_0 A} \left(T_0 + \frac{r_0}{\delta_0 \varepsilon} \right). \quad (13)$$

Подстановка заданных выше численных значений параметров модели и начальных условий в формулы (12)–(13) дает $K_\infty = 200 \text{ трлн USD}$, $T_\infty - T_0 = 4 \text{ }^\circ\text{C}$. Иными словами, отрицательная обратная связь через зависящую от температуры норму износа капитала является весьма существенной: в долгосрочной перспективе превышение температуры над современным уровнем составит $4 \text{ }^\circ\text{C}$, а капитал будет лишь на треть выше своего современного значения.

Отметим, что сходимость к стационарной точке в базовом сценарии будет носить осцилляционный характер с чрезвычайно большим периодом колебаний (рис. 2, 4).

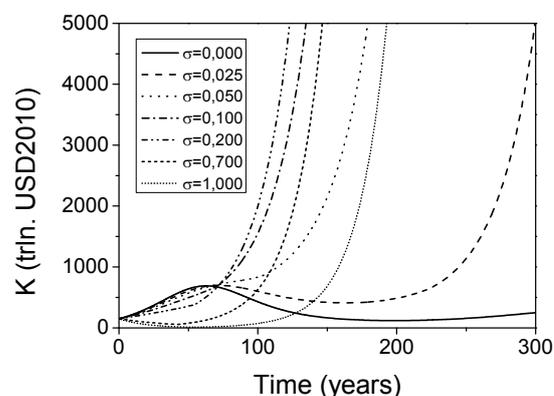


Рис. 2. Динамика капитала $K(t)$, рассчитанная по модели совокупной оценки при различных управляющих стратегиях

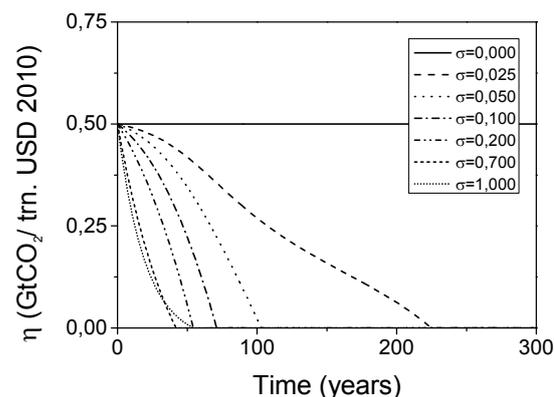


Рис. 3. Динамика карбоноёмкости мировой экономики $\eta(t)$, рассчитанная по модели совокупной оценки при различных управляющих стратегиях

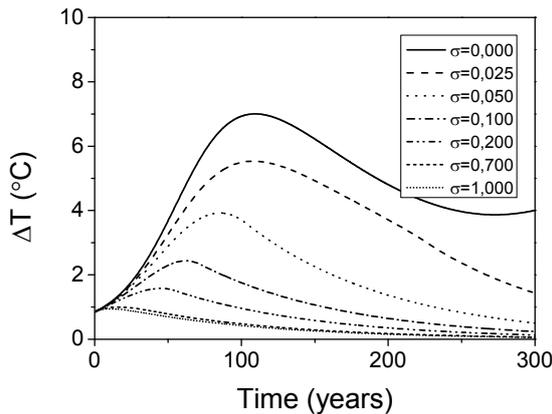


Рис. 4. Динамика превышения температурой доиндустриального уровня ($T(t)$), рассчитанная по модели совокупной оценки при различных управляющих стратегиях

Численный анализ неоптимальных решений. Ввиду сильной нелинейности рассматриваемой динамической системы (2)–(4) получение точного аналитического решения, к сожалению, невозможно ни в оптимизационной, ни в системно-динамической версии модели (за исключением выведенных выше формул (12)–(13) для асимптотических значений переменных состояния при базовом сценарии).

Мы не приводим здесь полного алгоритма решения описанной выше уравнениями (2)–(4), (11) модели в оптимизационной постановке с использованием принципа максимума Понтрягина, однако отметим, что из явного вида гамильтониана

$$\begin{aligned}
 H = & \ln(K(t) / K_0) \exp(-\rho t) + \\
 & + \varphi_K [r_0 - \delta_0 \varepsilon (T - T_0) - \sigma(t) s A] K - \\
 & - \varphi_\eta \beta_0 \sigma(t) s A K + \varphi_T (\xi \eta A K - \lambda_T T),
 \end{aligned} \quad (14)$$

где $\varphi_K, \varphi_\eta, \varphi_T$ – сопряженные функции, непосредственно следует, что в каждый момент времени он линеен по управлению $\sigma(t)$. Тогда, в соответствии с принципом максимума Понтрягина, оптимальное управление в каждый момент времени должно совпадать с одной из границ области управления $0 \leq \sigma(t) \leq 1$: либо $\sigma(t) = 0$ (все инвестиции направляются в рост капитала; инвестиции в снижение карбооемкости отсутствуют), либо $\sigma(t) = 1$ (все инвестиции направляются в снижение карбооемкости; инвестиции в рост капитала

отсутствуют). Как отмечалось, в соответствии с уравнением (3), при достижении момента полной декарбонизации экономики t^* , когда $\eta(t^*) = 0$, необходимость в дальнейших затратах на осуществление климатической политики в рассматриваемой модели отпадает, и начиная с этого момента можно положить $\sigma(t) = 0$. Кроме того, режимы особых экстремалей (сингулярных дуг) [6] в рассматриваемой задаче не реализуются. Подобные «крайности» (релейное управление) уже рождают определенные сомнения в том, будет ли найденное оптимальное решение «наилучшим» с практических позиций. Посмотрим, однако, к каким результатам приводят численные оценки полезности на неоптимальных решениях.

На рис. 2–4 показаны графики динамики переменных состояния модели (2)–(4) при управлениях следующей структуры: пока полная декарбонизация экономики не достигнута ($\eta(t) > 0$), $\sigma(t)$ постоянно и равно некоторому значению σ_0 ($0 \leq \sigma_0 \leq 1$); начиная с момента полной декарбонизации экономики ($\eta(t^*) = 0$) $\sigma(t) = 0$. Значения σ_0 , для которых выполнялись численные расчеты, представлены в первой строке таблицы и варьируются от сценария полного отсутствия климатической политики (базовый сценарий, $\sigma_0 = 0$) до сценария с максимально возможными инвестициями в снижение карбооемкости ($\sigma_0 = 1$). Во второй строке таблицы представлены соответствующие значения полезности \bar{U} , рассчитанные по формуле (11).

Параметр управления и полезность потребления

σ_0	0,000	0,025	0,050	0,100	0,200	0,700	1,000
\bar{U}	12,42	11,98	11,54	10,49	7,98	-6,39	-17,68

Как видим из таблицы, достаточно умеренные инвестиции в снижение карбооемкости лишь незначительно снижают полезность \bar{U} по сравнению с базовым сценарием. При этом, в соответствии с рис. 4, даже умеренный уровень расходов на осуществление климатической политики уже приводит к сильному снижению максимального значения температуры. В долгосрочной перспективе во всех рассмотренных сценариях (кро-



ме сценария с наибольшей полезностью) происходит полная декарбонизация экономики, после чего температура постепенно уменьшается до начального значения, а экономическая система переходит в режим потенциально неограниченного роста.

Выводы. Приведенный пример, когда сценарий с наибольшей полезностью (т.е., по предположению, «наилучший» вариант) оказывается наихудшим в долгосрочной перспективе, а «умеренно неоптимальные» сценарии с полезностью, незначительно сниженной относительно оптимального уровня, способствуют реализации эффективной климатической политики, можно нестрого сформулировать следующим образом: если теоретический максимум пологий, то при решении практических задач отклонение от точки максимума может быть и допустимым и даже желательным.

В связи с этим следует упомянуть плодотворное исследование [22], где сходные идеи развиты на математическом уровне строгости на примере известной модели совокупной оценки DICE, разработанной Уильямом Д. Нордхаузом [20]. В [22] ученый несколько упрощает модель DICE и, исследуя полезность в пространстве управлений, также при-

ходит к выводу о том, что максимум полезности в рассматриваемом случае является весьма пологим, оставляя широкое поле для «политических маневров».

Отметим также, что степень субоптимальности системно-динамических решений оценивалась в предшествующих наших работах для различных простых моделей экономического роста (системно-динамическая версия АК-модели [5] и др.).

Представляется, что в условиях «доминирования» оптимизационных моделей, как в теории экономического роста [1], так и в экономико-климатическом моделировании, приведенные нами аргументы, а также неоспоримая простота реализации и вычислительное быстроедействие методов численного интегрирования нелинейных динамических систем, в сравнении с численными методами динамической оптимизации, послужат дополнительным свидетельством перспективности методов системной динамики в задачах экономики изменений климата.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект № 12-06-00381-а «Оптимизационный и системно-динамический подходы в моделях экономики изменений климата»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барро Р.Дж., Сала-и-Мартин Х. Экономический рост: пер. с англ. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2010. 824 с.
2. Бахтизин А.Р. Агент-ориентированные модели экономики. М.: Экономика, 2008. 279 с.
3. Кирман А., Коландер Д., Фельмер Д., Хаас А., Голдберг М., Джузелиус К., Люкс Т., Слот Б. Финансовый кризис и провалы современной экономической науки: пер. с англ. // Вопросы экономики. 2010. № 6. С. 10–25.
4. Ковалевский Д.В. Экономико-климатическая модель с растущей нормой амортизации производственных фондов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2011. № 6(137). С. 218–221.
5. Ковалевский Д.В., Ковалевская Л.Д. Оценка субоптимальности системно-динамических решений АК-модели экономического роста // Вестник ИНЖЭКОНа. Серия «Экономика». 2012. Вып. 7(58). С. 137–143.
6. Лагоша Б.А. Оптимальное управление в экономике: учеб. пособие / Московский государственный университет экономики, статистики и информатики. М., 2004. 133 с.
7. Макаров В.Л. Искусственные общества // Экономика и математические методы. 2012. Т. 48. № 3. С. 3–20.
8. Малахов В.А., Дубынина Т.Г. Модель макроэкономических последствий ограничения эмиссии парниковых газов // Экономика и математические методы. 2010. Т. 46. № 2. С. 100–117.
9. Матвеев В.Д. Стимулирующие механизмы в экологически мотивированном регулировании: станут ли эффективными экологические политики в переходных и развивающихся экономиках? // Журнал Новой экономической ассоциации. 2010. № 8. С. 10–34.
10. Медоуз Д., Рандерс Й., Медоуз Ден. Пределы роста. 30 лет спустя: пер. с англ. М.: ИКЦ «Академкнига», 2008. 342 с.
11. Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу / под ред. В.М. Катцова и Б.Н. Порфирьева. М., 2011. 252 с.

12. **Порфирьев Б.Н.** Экономика климатических изменений. М.: Анкил, 2008. 168 с.

13. **Ровенская Е.А.** Модель оптимального экономического роста с учетом экологических факторов // Экономика и математические методы. 2012. Т. 48, № 4. С. 80–89.

14. **Форрестер Дж.** Мировая динамика; пер. с англ. М.: Наука, 1978. 168 с.

15. **Beinhocker E.D.** The Origin of Wealth. The Radical Remaking of Economics and What it Means for Business and Society. Boston, Massachusetts: Harvard Business School Press, 2006. 528 p.

16. **Capellán-Pérez I., González-Eguino M., Arto I., Ansuategi A., Dhavala K., Patel P., Markandya A.** New climate scenario framework implementation in the GCAM integrated assessment model. BC3 Working Paper Series 2014-04. Basque Centre for Climate Change (BC3), Bilbao, Spain, 2014. 46 p. URL: <http://www.bc3research.org/workingpapers/2014-04.html>

17. **Hasselmann K.** Detecting and responding to climate change // *Tellus B.* 2013. Vol. 65. 20088. <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.20088>

18. **Hasselmann K., Cremades R., Filatova T., Hewitt R., Jaeger C., Kovalevsky D., Voinov A., Winder N.** Free-riders to forerunners // *Nature Geo-*

science, 2015, vol. 8, pp. 895–898.

19. IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p.

20. **Nordhaus W.D.** A Question of Balance. New Haven & London: Yale University Press, 2008. 234 p.

21. **Nordhaus W.D., Yang Z.** A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies // *American Economic Review*, 1996, vol. 86, pp. 741–765.

22. **Smirnov A.** Attainability analysis of the DICE model. IIASA Interim Report IR-05-049. 2005. 23pp. URL: <http://webarchive.iiasa.ac.at/Admin/PUB/Documents/IR-05-049.pdf>

23. **Stern N.** The Stern Review on the Economics of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 712 p.

24. **Weber M., Barth V., Hasselmann K.** A multi-actor dynamic integrated assessment model (MADIAM) of induced technological change and sustainable economic growth // *Ecological Economics*, 2005, vol. 54, pp. 306–327.

REFERENCES

1. **Barro R.J., Sala-i-Martin X.** Economic Growth, 2nd edition. Cambridge: The MIT Press, 2003. 672 p. (rus)

2. **Bakhtisin A.R.** Agent-orientirovannye modeli jekonomiki. Moscow, Economics Publishing House, 2008. 279 p. (rus)

3. **Colander D., Föllmer H., Haas A., Goldberg M., Juselius K., Kirman A., Lux Th., Sloth B.** The Financial Crisis and the Systemic Failure of Academic Economics. Kiel Working Paper 1489. Kiel Institute for the World Economy, February 2009. 17 p. URL: https://www.ifw-members.ifw-kiel.de/publications/the-financial-crisis-and-the-systemic-failure-of-academic-economics/KWP_1489_ColanderetalFinancial%20Crisis.pdf (rus)

4. **Kovalevsky D.V.** An economy-climate model with growing capital depreciation rate. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 2011, no. 6(137), pp. 218–221. (rus)

5. **Kovalevsky D.V., Kovalevskaya L.D.** Estimations of sub-optimality of system-dynamic solutions of the AK model of economic growth. *Herald of ENGECON. Economics*, 2012, no. 7(58), pp. 137–143. (rus)

6. **Lagoshva B.A.** Optimal'noe upravlenie v jekonomike. Moscow State University of Economics, Statistics and Informatics. Moscow, 2004. 133 p. (rus)

7. **Makarov V.L.** Artificial societies. *Economics and Mathematical Methods*, 2010, vol. 48, no. 3, pp. 3–20. (rus)

8. **Malakhov V.A., Dubynina T.G.** Model of the macroeconomic consequence of greenhouse gases emissions limitations. *Economics and Mathematical Methods*, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 100–117. (rus)

9. **Matveenko V.D.** Stimulating mechanisms in ecologically motivated regulation: Will ecological policies in transition and developing countries become efficient? *Journal of the New Economic Association*, 2010, no. 8, pp. 10–34. (rus)

10. **Meadows D., Randers J., Meadows D.** Limits to Growth. The 30-Year Update. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing Co., 2004. 338 p. (rus)

11. Ocenka makroekonomicheskikh posledstvij izmenenij klimata na territorii Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda i dal'nejshuju perspektivu. V.M. Kattsov and B.N. Porfirjev (eds.). Moscow, 2011. 252 p. (rus)

12. **Porfirjev B.N.** Jekonomika klimaticheskikh izmenenij. Moscow: Ankil, 2008. 168 p. (rus)

13. **Rovenskaya Ye.A.** A model of optimal economic growth and environmental constraints. *Economics and Mathematical Methods*, 2012, vol. 48, no. 4, pp. 80–89. (rus)

14. **Forrester J.W.** World Dynamics. Cambridge, Massachusetts: Wright–Allen Press, Inc. 1971. 142 p. (rus)

15. **Beinhocker E.D.** The Origin of Wealth. The Radical Remaking of Economics and What it Means for Business and Society. Boston, Massachusetts: Harvard Business School Press, 2006. 528 p.

16. **Capellán-Pérez I., González-Eguino M., Arto I., Ansuategi A., Dhavala K., Patel P., Markandya A.**



New climate scenario framework implementation in the GCAM integrated assessment model. BC3 Working Paper Series 2014-04. Basque Centre for Climate Change (BC3), Bilbao, Spain, 2014. 46 p. URL: <http://www.bc3research.org/workingpapers/2014-04.html>

17. **Hasselmann K.** Detecting and responding to climate change. *Tellus B*, 2013, vol. 65, 20088. URL: <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.20088>

18. **Hasselmann K., Cremades R., Filatova T., Hewitt R., Jaeger C., Kovalevsky D., Voinov A., Winder N.** Free-riders to forerunners. *Nature Geoscience*, 2015, vol. 8, pp. 895–898.

19. IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p.

20. **Nordhaus W.D.** A Question of Balance. New Haven & London: Yale University Press, 2008. 234 p.

21. **Nordhaus W.D., Yang Z.** A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies. *American Economic Review*, 1996, vol. 86, pp. 741–765.

22. **Smirnov A.** Attainability analysis of the DICE model. IASA Interim Report IR-05-049. 2005. 23 p. URL: <http://webarchive.iiasa.ac.at/Admin/PUB/Documents/IR-05-049.pdf>

23. **Stern N.** The Stern Review on the Economics of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 712 p.

24. **Weber M., Barth V., Hasselmann K.** A multi-actor dynamic integrated assessment model (MADIAM) of induced technological change and sustainable economic growth. *Ecological Economics*, 2005, vol. 54, pp. 306–327.

КОВАЛЕВСКИЙ Дмитрий Валерьевич – старший научный сотрудник, руководитель группы, Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена», доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, кандидат физико-математических наук. 199034, 14-я линия В.О., д. 7, оф. 49, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: d_v_kovalevsky@list.ru

KOVALEVSKY Dmitrii V. – Scientific Foundation «Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre», Saint Petersburg State University. 199034, 14th Line 7. Office 49. Vasilievsky Island. St. Petersburg. Russia. E-mail: d_v_kovalevsky@list.ru

Статья поступила в редакцию: 26.06.16