

Системно-динамическое моделирование стратегии декарбонизации экономики

О. И. Дранко¹, А. С. Богомолов², А. Ф. Резчиков¹, А. Д. Цвиркун¹, И. А. Степановская¹

¹Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

²Саратовский научный центр РАН

olegdranko@gmail.com; alexbogomolov@yandex.ru; rw4cy@mail.ru; tsvirkun@ipu.ru;irstepan@ipu.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке методологии анализа сложно-структурированных систем показателей управления проектами декарбонизации экономики. Предлагаемая методология основывается на формальном описании сценариев управления с помощью моделей системной динамики в сочетании с методами представления и обработки экспертных знаний о причинных связях.

Ключевые слова: углеродный след, декарбонизация экономики, системная динамика, климатическая повестка

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все более острой становится проблема критического воздействия углеродоемкой экономики на глобальное потепление планетарного уровня. Организация объединенных наций считает изменение климата вызовом цивилизации, инициирующим развитие возобновляемой и водородной энергетики [1–5].

На сегодняшний день в повестке дня – управление снижением до нуля выбросов парниковых газов (водяной пар, диоксид углерода, метан, закись азота и др.). Большой научно-практический интерес приобретают комплексы моделирования сценариев декарбонизации для стран, регионов и секторов экономики [6]. Подробному обзору разработок этого круга, проводимых в ЕС, США, странах АТР и России, посвящена работа [7]. Наглядным примером может служить набор связанных моделей (PRIMES, GEM-E3, GAINS), используемых Греческой наукоёмкой консалтинговой компанией E3-Modeling. Ее цель – моделирование вариантов стратегий согласования энергетики, экономики и окружающей среды.

Многоагентная модель PRIMES прогнозирует параметры энергетической системы (спрос на энергию, предложения, цены и инвестиции, выбросы) и оптимизирует их (максимизация полезности, минимизация затрат и рыночное равновесие). Модель GEM-E3 описывает взаимодействие макроэкономики с окружающей средой и энергетической системой. Модель представляет собой межрегиональную, многоотраслевую, рекурсивную динамическую вычислимую функцию общего равновесия. Модель GAINS позволяет оценивать стратегии сокращения выбросов и загрязнения, которые используются для анализа загрязнения воздуха и изменения климата.

Совокупность указанных моделей позволяет строить, обосновывать и выбирать стратегии адаптации экономики к процессу мировой декарбонизации.

Данная статья посвящена следующему этапу стратегического планирования, связанному с моделированием национальных мегапроектов декарбонизации экономики [8].

Цель этого этапа – обеспечить межотраслевую и межнациональную координацию в решении следующих ключевых задач:

- поддержка единого понимания содержания и целей процесса декарбонизации на мировом, национальном и отраслевом уровне,
- создание научно-производственного задела для развития низко углеродных технологий,
- подготовка кадров,
- систематизация процесса трансформации и перехода национальных экономик на низкоуглеродную энергетику с учетом интересов и особенностей разных стран,
- оценка масштабов инвестиционной программы,
- поддержка повышения рейтинга страны, по результативности и темпам декарбонизации экономики.

Значительным потенциалом для экономически и технологически эффективного решения этой крупномасштабной проблемы обладает концепция мягких измерений и вычислений [9]. Проблему ее реализации составляет динамическое моделирование для сопровождения дорожных карт в условиях неполноты информации о будущих факторах и возможностях.

Предлагаемый в данной статье подход базируется на формализации мягкого измерения процессов декарбонизации стран на основе диаграмм и графовых моделей причинно-следственных связей (ПСС) между целями, состояниями, процессами, событиями. Первооснову подхода составляют методы гибридной системной динамики, развивающие классический метод Форрестера применительно к сценарным стратегическим исследованиям [10, 11]. Далее в разделах II-V описываются три системно-динамические модели добычи и представления экспертных знаний для поддержки ежегодного анализа и коррекции стратегии управления мегапроектами декарбонизации экономики условной страны.

II. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦЕЛЕПОЛАГАНИЯ

Сформировавшаяся на сегодняшний день мировая практика мягкой оценки выбросов парниковых газов базируется на абстрактных понятиях «углеродного следа» и воплощенного углерода [12, 13]. Углеродный

след – вычисляемый эквивалент выбросов парниковых газов, оцениваемый в млн тонн CO₂. В объемах углеродного следа измеряется углеродоемкость систем, товаров, инфраструктур, отраслей, стран.

Расчетные и прогнозные оценки углеродного следа фигурируют в директивных документах разнообразных национальных и межнациональных проектов и программ достижения углеродной нейтральности и развития низкоуглеродной экономики.

Понятие «воплощенного» углерода трансформирует классическую статистику о торговых отношениях между странами в ежегодный мониторинг и сравнение стран с позиций импортера, экспортера и производителя (генератора) CO₂ (TiVA, см. <http://oe.cd/tiva>).

Такой контент поддерживает ежегодный синтез диаграмм, упорядочивающих произвольный набор стран по объемам производства, экспорта и импорта CO₂ соответственно. Примером служит диаграмма, представленная на рис. 1, позволяющая оценить долевую и относительную позицию страны в производстве, экспорте и импорте CO₂. Указанная диаграмма играет роль динамической модели добычи и представления знаний о приоритетных целях национальных проектов и программ декарбонизации.

III. МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ДЕКАРБОНИЗАЦИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ

Универсальная модель динамики процесса декарбонизации любой страны представлена на рис. 2. Граф описывает двухконтурный процесс постепенного замещения источников углеродной энергетики источниками низкоуглеродной (зеленой) энергетики и оценки роста/снижения темпов социально-экономического развития.

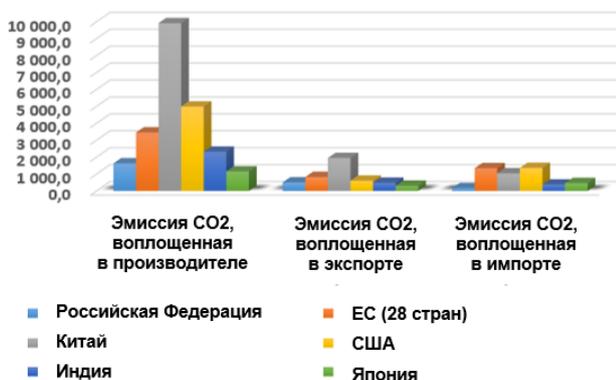


Рис. 1. Общий объем выбросов CO₂ (тонны, миллионы), 2018 г.

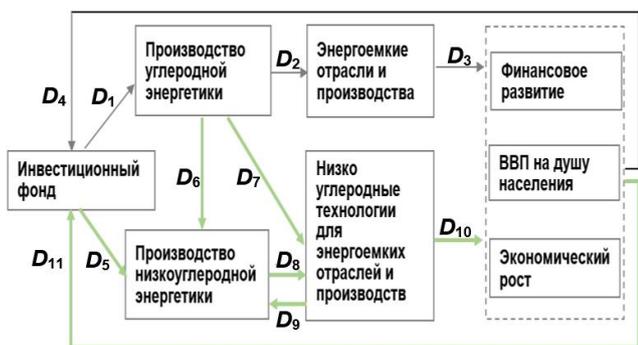


Рис. 2. Двухконтурный граф стратегии декарбонизации экономики

Множество дуг {D1, D2, D3, D4} – замкнутый контур инвестирование в развитие углеродной экономики. Множество дуг {D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11} – замкнутый контур инвестирования в развитие низкоуглеродной экономики.

Метки дуг рассматриваемого графа имеют следующую интерпретацию.

- $D_1(t)$ – ежегодные объемы инвестиций в производство углеродной энергетики,
- $D_2(t)$ – ежегодные объемы углеродной энергии, вкладываемые в энергоемкие отрасли и производства,
- $D_3(t)$ – ежегодные объемы прибыли, используемые для расчета показателей эффективности инвестирования в экономическое развитие, основанное на углеродной энергетике,
- $D_4(t)$ – ежегодные объемы реинвестирования прибылей углеродной экономики,
- $D_5(t)$ – ежегодные объемы инвестиций в производство низкоуглеродной энергетики,
- $D_6(t)$ – ежегодные объемы углеродной энергии, расходуемые на производство низкоуглеродной энергетики,
- $D_7(t)$ – ежегодные объемы углеродной энергии, расходуемые на развитие низкоуглеродных технологий для энергоемких отраслей и производств,
- $D_8(t)$ – ежегодные объемы низкоуглеродной энергии, расходуемые на развитие низкоуглеродных технологий для энергоемких отраслей и производств,
- $D_9(t)$ – ежегодные объемы прибыли, получаемые от внедрения низкоуглеродных технологий для энергоемких отраслей и производств в производство низкоуглеродной энергетики,
- $D_{10}(t)$ – ежегодные объемы прибыли, используемые для расчета показателей эффективности инвестирования в экономическое развитие, основанное на низкоуглеродной энергетике,
- $D_{11}(t)$ – ежегодные объемы реинвестирования прибылей низкоуглеродной экономики.

Цель данного графа – упреждающая сигнализация о негативных последствиях отклонений реальных от директивных сроков запуска технологий низкоуглеродной экономики.

IV. МОДЕЛЬ ИНВЕСТИЦИОННОЙ ПРОГРАММЫ МЕГАПРОЕКТА ДЕКАРБОНИЗАЦИИ СТРАНЫ

Реализация мегапроекта декарбонизации экономики ставит проблему моделирования инвестиционной деятельности. Перспективным подходом к решению этой проблемы служит моделирование сценария управления проектами, позволяющими добиться поставленных целей. Примером такого сценария служит граф сценария снижения углеродного следа и повышения климатического рейтинга страны, представленный на рис. 3.

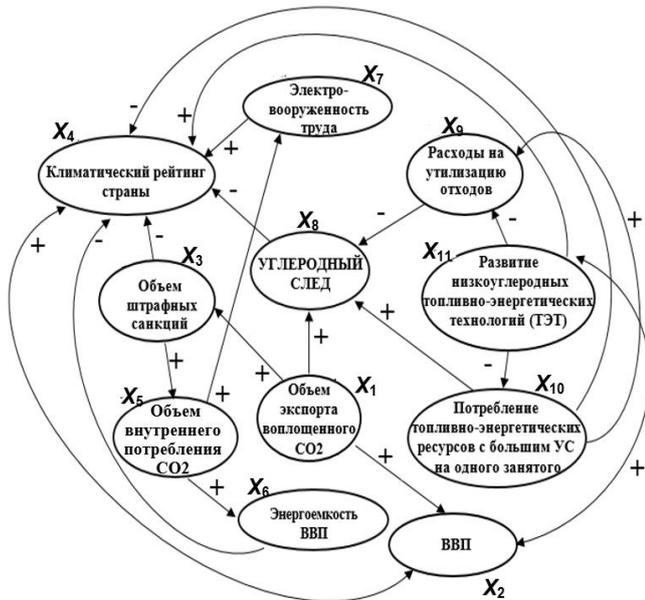


Рис. 3. Причинно-следственная модель снижения углеродного следа

Вершинам графа соответствуют качественные показатели, оценивающие системную динамику уровней достижения макроцелей мегапроекта.

- $X_1(t)$ – экспорт воплощенного CO_2 ,
- $X_2(t)$ – валовый внутренний продукт (ВВП),
- $X_3(t)$ – штрафные санкции (пограничный налог) за экспорт воплощенного CO_2 ,
- $X_4(t)$ – климатический рейтинг страны,
- $X_5(t)$ – внутреннее потребление воплощенного CO_2 ,
- $X_6(t)$ – энергоемкость ВВП,
- $X_7(t)$ – электровооруженность труда,
- $X_8(t)$ – углеродный след,
- $X_9(t)$ – расходы на утилизацию отходов,
- $X_{10}(t)$ – потребление топливно-энергетических ресурсов с большим углеродным следом на одного занятого в экономике страны,
- $X_{11}(t)$ – уровень развития низкоуглеродных топливно-энергетических технологий.

Дуги графа ПСС демонстрируют пути и контуры положительной и отрицательной связи в корпоративной динамике изменения и достижения целевых показателей мегапроекта. Дугам сопоставлены наборы проектов, представляющих механизмы перехода от достижения одной макроцели к другой.

Приведенный граф ориентируется на экономически целесообразную стратегию циклического многоэтапного инвестирования комплексов проектов, управляющих изменениями в ходе развития низкоуглеродной экономики. В рассматриваемом примере участвуют комплексы проектов трех категорий:

- развитие низкоуглеродной энергетики, например, производство водородных топливных элементов и их логистической доставки потребителям (X_9, X_{10}, X_{11}),

- разработка и реализация политики экспорта продуктов и услуг низкоуглеродной экономики (X_1, X_2, X_3),
- рост энерговооруженности труда и снижение энергоемкости ВВП за счет повышения сырьевой эффективности и развития циркулярной экономики (X_5, X_6, X_7).

V. ИЛЛУСТРАТИВНЫЙ ПРИМЕР РАСЧЕТА СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ МАКРОЦЕЛЕЙ МЕГАПРОЕКТА

Важную проблему разработки инвестиционной программы мегапроекта составляет анализ закономерностей системной динамики трендов изменения показателей. В данном разделе приводится схема оценки влияния роста объема экспорта воплощенного CO_2 на торможение темпов снижения углеродного следа и климатического рейтинга страны.

Представленная графовая причинно-следственная модель снижения углеродного следа показывает, что рост экспорта воплощенного CO_2 $X_1(t)$ является динамическим фактором риска, препятствующим сокращению углеродного следа. Как видно, экспорт воплощенного CO_2 $X_1(t)$ в этой модели не зависит от других переменных, но влияет на них. Это позволяет рассматривать $X_1(t)$ как внешний фактор и управляющую переменную для воздействия на другие переменные.

Разностные уравнения, согласованные с трендами, описанными в табл. I, принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta X_1 &= F(X_1(t)) \\ \Delta X_2 &= k_2 X_1(t) X_4(t) X_{11}(t) \\ \Delta X_3 &= k_3 X_1(t) \\ \Delta X_4 &= k_4 X_2(t) X_7(t) X_{11}(t) - k_{4,1} X_3(t) X_6(t) X_8(t) X_{10}(t) \\ \Delta X_5 &= k_5 X_3(t) \\ \Delta X_6 &= k_6 X_5(t) \\ \Delta X_7 &= k_7 X_5(t) \\ \Delta X_8 &= k_8 X_1(t) X_{10}(t) - k_{8,1} X_9(t) \\ \Delta X_9 &= k_9 X_{10}(t) - k_{9,1} X_{11}(t) \\ \Delta X_{10} &= k_{10} X_{11}(t) \\ \Delta X_{11} &= k_{11} X_{10}(t) \\ \Delta X_i &= X_i(t+1) - X_i(t), i=1, 2, \dots, 11. \end{aligned}$$

Значения коэффициентов $k_i, i = 2, \dots, 11, k_{4,1}, k_{8,1}, k_{9,1}$ для рассматриваемого примера выбраны в результате экспертного анализа тенденций в динамике переменных и уточнены на основе результатов вычислительных экспериментов. Правая часть уравнения для управляющей переменной $X_1(t)$ в примере модели принимает вид $\Delta X_1 = X_1(t)(u-1)$, где u – коэффициент годового изменения, где $-$ коэффициент годового изменения $X_1(t)$ в рассматриваемом интервале времени.

Выбранная схема позволяет оценивать влияние сценариев последовательного снижения экспорта, воплощенного CO_2 с большим углеродным следом на динамику других рассматриваемых показателей. Показателями в примере служат климатический рейтинг $X_4(t)$ и углеродный след $X_8(t)$. Значения переменных берутся относительно данных за 2022 год, и система рассматривается за период с 2022 по 2027 год. Ниже

приведены некоторые результаты вычислительных экспериментов с построенной моделью.

Если ежегодное снижение экспорта воплощенного CO₂ с 2022 года составит 20 % ($u=0,8$), рост климатического рейтинга к 2027 году также составит около 13 %, а сокращение углеродного следа составит чуть более 14 %, см. рис. 4.

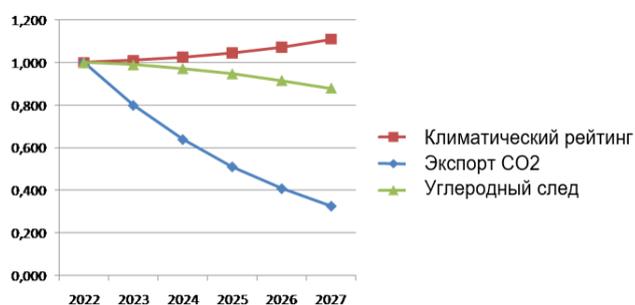


Рис. 4. Изменение климатического рейтинга и углеродного следа при ежегодном снижении экспорта воплощенного CO₂ на 20 %

Если ежегодное снижение экспорта воплощенного CO₂ с 2022 года составит 10 % ($u=0,9$), рост климатического рейтинга к 2027 году также составит около 10 %, а сокращение углеродного следа составит чуть более 11 %.

Если ежегодное снижение экспорта воплощенного CO₂ с 2022 года составит 5 % ($u = 0,95$), углеродный след уменьшится на 11 %.

Таким образом, эти и другие результаты вычислительных экспериментов позволяют нам отметить, что резкое снижение экспорта, воплощенного CO₂, согласно построенной модели, не приводит к такому же значительному повышению климатического рейтинга и уменьшению углеродного следа. Мы приходим к выводу, что целесообразно постепенно сокращать экспорт воплощенного CO₂, чтобы получить желаемую динамику остальных показателей.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен методологический подход к организации управления мегапроектом декарбонизации экономики на основе мягких вычислений, проводимых в формате гибридного системно-динамического моделирования различных аспектов снижения углеродного следа страны. В предложенной структуре закладываются процедуры рейтингования стран по объемам производства, импорта и экспорта воплощенного CO₂. Преимущество такого подхода заключается в повышении объективности принимаемых решений, устранении предвзятости, глубоком учете национальных особенностей, интересов и возможностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Макаров И. Глобальное изменение климата как вызов мировой экономике и экономической науке // Экономический журнал Высшей школы экономики. № 3, 2013, с. 512-532.
- [2] Мастепанов А.М. Углеродная нейтральность как основной вектор предстоящего развития мировой энергетики. Москва: Издательский центр Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) им. Губкина. 2022, 437 с.
- [3] Akinfiyev V.K., Dranko O.I. Modeling Investment Decisions to Increase Renewable Generation. 2022, IFAC-PapersOnLine, 55(9), pp.59-63.
- [4] Dranko O.I., Dvoryashina M.M., Blagodarnyy Y.V. The Growth Assessment of Renewable Energy in Russia: the Retrospective Analysis, IFAC-PapersOnLine, 2022. 55(9), pp. 64-69.
- [5] A.D. Tsvirkun, A.F. Rezchikov, O.I. Dranko, I.A. Stepanovskaya, Approach to Building a Model Complex for Managing the Development of Hydrogen Energy. 14th International Conference Management of large-scale system development (MLSD), 9600110, 2021.
- [6] Wallace T., Olson A., Mueller S., Patel K. Electricity Resource Compensation Under a Net Zero Future. International Journal of Energy, Environment and Economics Energy and Environmental Economics, Inc., Sept. 2022
- [7] Грушевенко Е. Моделирование сценариев декарбонизации и адаптации: роль в принятии политических и экономических решений Май 2021. Центр энергетики Московской школы управления. Сколково, 2021, 52.с.
- [8] Джемала М. Корпоративная дорожная карта - инновационный метод управления знаниями в корпорации // Российский журнал менеджмента. № 4, 2008, с.149-168.
- [9] Averkin A.N., Yarushev S.A. Hybrid intelligent system of rules extraction for decision making // Journal of Physics: Conference Series: 23, St. Petersburg, 27–29 мая 2020 года. St. Petersburg, 2020. P.012007.
- [10] Резчиков А.Ф., Лучников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю. Минимизация ущерба от сбоев технологических процессов в роботизированных сварочных технологических комплексах // Мехатроника, Автоматизация, Управление. Том 18(5), 2017, с.328-332.
- [11] Яндыбаева Н., Резчиков А., Кушников В., Иващенко В., Кушников О., Цвиркун А. Математические модели, алгоритмы и программный комплекс для обеспечения национальной безопасности России // Исследования в области систем, принятия решений и контроля, том 199, 2019, с. 646-659.
- [12] Wiedmann T., Minx J. A Definition of Carbon Footprint, In: C.C. Pertsova, Ecological Economics Research Trends: Chapter 1, pp. 1-11, Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA, 2008.
- [13] Xinyuan Wei, Jianheng Zhao, Daniel J. Hayes, Adam Daigneault and He Zhu. Carbon Balance and Management A life cycle and product type based estimator for quantifying the carbon stored in wood products. Carbon Balance and Management. 18(1). 1-10. 2023. 10.1186/s13021-022-00220-y.