

ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА МОНИТОРИНГА УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА

Резчиков А.Ф., Цвиркун А.Д., Дранко О.И., Степановская И.А.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.65*

rw4cy@mail.ru, tsvirkun@ipu.ru, olegdranko@gmail.com,irstepan@ipu.ru

Кушников В.А., Богомолов А.С.

*ФГБУН ФИЦ «Саратовский научный центр Российской Академии Наук»,
Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24*

Kushnikoff@iptmuran.ru, Bogomolov@iptmuran.ru

Аннотация: В условиях развития мировой цивилизации все более актуальной становится климатическая повестка. Существенное влияние на климат оказывает увеличение так называемого углеродного следа. Ситуация в этой области складывается таким образом, что противодействие изменению климата реализуется децентрализованно на уровне политик и программ отдельных стран. В этих условиях встает проблема разработки технологий цифрового моделирования и проектирования национальных стратегий снижения углеродного следа, основанного на причинно-следственных комплексах системной динамики, хорошо зарекомендовавших себя в исследованиях крупномасштабных процессов планетарного уровня.

Ключевые слова: углеродный след, парниковые газы, климатический рейтинг, системная динамика.

Введение

В настоящее время все большее научное подкрепление получает гипотеза о критическом воздействии выбросов парниковых газов (водяной пар, диоксид углерода, метан, закись азота и др.) на наблюдаемое глобальное потепление планетарного уровня. ООН считает наблюдаемое изменение климата вызовом цивилизации [1], который ставит новые крупномасштабные управленческие задачи мировой экономической науки. К их числу, в первую очередь, относится системно-динамическое моделирование, ориентированное на экономико-климатическое регулирование. Модели этого класса позволяют варьировать темпы макроэкономического роста и развития в сочетании с перебором вариантов политики ограничений на эмиссию парниковых газов, и на этой основе искать стратегии развития мировой экономики, согласованные с приемлемыми темпами снижения ее карбон ёмкости.

Данная работа посвящена одному из перспективных подходов к дальнейшему развитию системно-динамического моделирования, связанному с его подключением к базам фактической информации, отражающей реальную динамику как экономических показателей стран мира, так и соответствующих объемов выбросов парниковых газов. Такой подход отрывает широкие возможности по анализу долевого участия стран в общем объеме выбросов парниковых газов и разработке механизмов регулирования, основанных на системе климатического рейтингования.

1 Климатический рейтинг - перспективный формат управления снижением выбросов парниковых газов

Формирующийся на сегодняшний день подход к проблеме экономико-климатического регулирования базируется на абстрактных понятиях, позволяющих оценивать выбросы парниковых газов. К числу таких понятий относятся «воплощенные выбросы», «воплощенные выбросы углерода» или «воплощенный углерод». По определению, воплощенные выбросы — это выбросы, производимые до того, как система (объект, технология и т.п.) будет введена в эксплуатацию. Понятия введены по рекомендации Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций (РКИК ООН) об изменении климата с тем, чтобы измерять выбросы в соответствии с производством, а не потреблением. Ответственность за воплощенные выбросы импортируемых товаров несет экспортирующая, а не импортирующая страна.

Углеродный след – вычисляемый эквивалент выбросов парниковых газов, оцениваемый в млн. тонн CO₂. Эта единая мера воздействия на климат находит самое разнообразное применение. В объемах углеродного следа измеряется углеродоемкость систем, товаров, инфраструктур, отраслей, стран. Оценки динамики снижения углеродного следа используются в процедурах рейтингования стран мира по эффективности борьбы с изменениями климата. Кроме того, расчетные и прогнозные оценки углеродного следа фигурируют в директивных документах разнообразных национальных и межнациональных проектов и программ достижения углеродной нейтральности и развития низкоуглеродной экономики [2,3].

Понятие «воплощенного» углерода [4,5] позволяет рассчитать национальную долю углеродного следа инновационного продукта, производимого цепочкой добавленной стоимости (ЦДС). Для этого проводится оценка каждой из стран-участниц ЦДС по трем позициям: как импортера, воплощенного CO₂, экспортера воплощенного CO₂ и производителя во (порождение) воплощенного CO₂ для собственных нужд. Указанные оценки влияют на ценообразование товарной продукции таким образом, что ущемляется бизнес стран-поставщиков сырья, за счет чего возникает бизнес-эффект для импортеров этого сырья. Примером служит проект Европейского союза ввода налога на ввозимые в ЕС товары в зависимости от их углеродного следа.

Приведенный пример бизнес-конфликта, демонстрирует вхождение мира в сложный политико-экономический период. Степень координации и сотрудничество между различными странами в экономико-климатическом регулировании, возможно, будет резко уменьшаться. Поэтому управление снижением углеродных выбросов все более переносится на уровень национальных программ. Каждой стране предоставляется возможность исходить из собственных интересов и планов развития низкоуглеродной экономики. Однако при этом включается механизм климатического рейтингования стран, мотивирующий страны на активное участие в общепланетарном процессе снижения углеродного следа. Таким образом, основным инструментом отслеживания эффективности стран в области защиты климата становится климатический рейтинг.

Примером системы климатического рейтингования служит Индекс эффективности борьбы с изменением климата (англ. Climate Change Performance Index, CCPI), разработанный немецкой экологической организацией Germanwatch. На основе стандартизированных критериев индекс оценивает и сравнивает эффективность борьбы с изменением климата среди 57 стран и Европейского Союза, чья общая доля выбросов парниковых газов составляет более чем 90 % от мировых. Индекс составляется ежегодно с 2005 года.

Методика подсчета CCPI предполагает использование 14 критериев по следующим четырём категориям:

- выбросы парниковых газов (40 % от общей оценки);
- возобновляемая энергия (20 % от общей оценки);
- потребление энергии (20 % от общей оценки);
- климатическая политика (20 % от общей оценки).

Категории «выбросы парниковых газов», «возобновляемая энергия», и «потребление энергии» определяются при помощи четырёх одинаковых по значимости критериев: 1) текущий уровень, 2) последние достижения (за 5 лет), 3) текущий уровень эффективности борьбы с изменением климата и его совместимость со сдерживанием глобального потепления на уровне ниже 2°C, 4) совместимость целей на 2030 год со сдерживанием глобального потепления на уровне ниже 2°C. Эти двенадцать критериев суммируются с такими критериями, как основы и осуществление национальной климатической политики и дипломатия в области изменения климата, относящимся к категории «Климатическая политика». Результаты каждого из критериев оцениваются как «очень высокий», «высокий», «средний», «низкий», «очень низкий».

Хорошую предпосылку для проведения экологического рейтингования составляют международные обязательства стран-эмитентов парниковых газов на раскрытие нефинансовой отчетности данных о торговых операциях услугами, товарами и соответствующими промежуточными продуктами. Такая информация поступает в различные базы данных. Примером служит открытая ежегодно дополняемая база данных Tiva. Предоставляя пользователям доступ к полной информации о динамике и текущих оценках воплощенного CO₂ в различных семантических разрезах по годам, странам, отраслям и др., Tiva становится перспективным информационным ресурсом для цифрового стенда моделирования и демонстрации национальной стратегии управления снижением национального углеродного следа и/или достижения углеродной нейтральности страны.

Центральной проблемой разработки такого стенда является выбор единого математического аппарата для цифрового моделирования углеродного следа страны на основе Tiva и других баз фактической информации, тематически и семантически совместимых с ней. Снижение углеродного следа страны относится к долгосрочным крупномасштабным процессам управления проектами, для реализации которого не возможны и не перспективны точные расчеты, всеобъемлющие по охвату направлений и задач контроля и оптимизации.

Адекватным подходом служит квазиоптимальное управление на основе причинно-следственных комплексов и системной динамики, оперирующего глобальными переменными-уровнями (загрязнения, капиталовложения, долей отраслей и стран и др.), переменными темпов (производства.

образования загрязнения, фондообразования, использования природных ресурсов) и переменных-параметров (качество, материальный уровень, эффективность фондов и др.).

Ключевыми преимуществами такого подхода для реализации функций цифрового стенда стратегий управления являются прозрачность принципиальной алгоритмической структуры, а также представление стратегий разных стран в различных сопоставительных и сравнительных информационных разрезах.

2 Использование методов системной динамики для прогнозирования и анализа возможных сценариев развития ситуации с углеродным следом

Системная динамика используется для изучения сложных систем путем анализа их поведения в зависимости от состава, структуры и взаимосвязей частей. Как методология и инструмент исследования системная динамика развивалась в XX веке Джейм Форрестером, Деннисом Медоузом [6-9] и их последователями. Направление имеет достаточно длительную историю [10] и в настоящее время занимает свое место в спектре методов исследования сложных человеко-машинных и организационно-технических, крупномасштабных систем, которые характеризуются наличием значительного количества нелинейных прямых и обратных связей между переменными из подсистем различного происхождения.

Комплекс моделей системной динамики включает в себя причинно-следственные модели (графы, матрицы) и системы уравнений, решение которых позволяет производить аппроксимацию динамики исследуемых переменных. Аппроксимация производится с целью анализа возможных вариантов поведения системы в прошлом и будущем, для чего с моделью проводятся соответствующие вычислительные эксперименты. При этом требуется определить и обосновать процедуры проверки адекватности разработанных моделей, а также их модификации с целью уточнения.

Модели системной динамики используются при постановке и решении задач управления системами различного масштаба и назначения [11-15]. В таких задачах движение системы задается уравнениями динамики ее рассматриваемых переменных, а оптимум ищется по критерию, зависящему от этих переменных, искомым управляющим воздействием и внешних условий. В результате решения задачи определяются управляющие воздействия, доставляющие этому критерию оптимальное значение при заданных ограничениях.

При разработке математической модели системной динамики выполняются следующие этапы.

- Определение множества $S_1(t), \dots, S_n(t)$ переменных системы и множества внешних факторов $P_1(t), \dots, P_m(t)$ влияния на эти переменные. Внешние факторы считаются не зависящими от выбранных переменных и других внешних факторов. Для переменных и внешних факторов необходимо определить единицы измерения, источники данных, откуда будет браться статистика по этим переменным за исследуемые периоды и способ вхождения этих переменных в уравнения, содержащие также и переменные, измеряемые в других единицах. Таким способом может быть нормирование, при котором в уравнение входят не сами переменные, выраженные в различных единицах измерения (количество часов, сотрудников, денежных средств и т.д.), а их значения, взятые относительно соответствующих значений в некоторый известный момент времени, например, за начальный год исследуемого периода. В этом случае величина, входящая в уравнение, рассматривается как безразмерная.
- Определение причинно-следственных связей переменных системы и влияние внешних факторов на эти переменные, разработка причинно-следственных схем, отражающих эти взаимосвязи. В качестве таких систем традиционно рассматривались причинно-следственные схемы (графы, например, граф на рисунке 6 выше), отражающие положительное и отрицательное влияние между переменными. Однако при большом количестве переменных и связей более практичными для составления уравнений являются причинно-следственные схемы в виде матриц (таблиц) [8]. Для того чтобы учесть различные условия изменения переменных, в более общем случае предлагается каждой клетке (i,j) такой матрицы $G_{i,j}$ сопоставлять функцию $G_{i,j}(Y_1(t), \dots, Y_k(t), t)$. Множество переменных $Y_1(t), \dots, Y_k(t)$ этой функции может пересекаться с множеством системных переменных, внешних факторов и переменных среды. Каждая такая функция, отражающая часть переменной причинно-следственной схемы, принимает значения на множестве $\{0, 1, -1\}$. Эти значения показывают влияние переменной или фактора из столбца с номером i на переменную из строки с номером j при условиях, которые создаются текущими моментами и значениями переменных $Y_1(t), \dots, Y_k(t)$: «1» – вызывает рост, значение «-1» – вызывает снижение, значение «0» – влияние не учитывается в рассматриваемой модели. Множество значений функций $G_{i,j}(Y_1(t), \dots, Y_k(t), t)$ может быть

также и иным (например, лингвистические значения). Причинно-следственные связи определяются по корреляционной зависимости рядов соответствующих данных и по экспертным суждениям о физическом смысле происходящих явлений. При этом по результатам проверки адекватности модели связи на одном и том же интервале времени могут быть скорректированы в модели.

- Построение на основе определенных причинно-следственных схем системы уравнений системной динамики и определить способы их решения. Ввиду наличия нелинейных связей, а также относительно большого количества факторов и переменных уравнения системной динамики часто решаются численными методами.
- Решение построенных систем уравнений, проверка адекватности построенной модели, используя исторические данные. В случае, если значение характеристик адекватности модели оказываются неприемлемыми, необходимо определить этапы, на которых начинается коррекция построенной модели и возврат к ним.
- Если показатели адекватности построенной модели оказываются на требуемом уровне, проведение вычислительных экспериментов для решения поставленных задач и вопросов. К таким вопросам относятся прогнозирование динамики переменных системы, определение управляющих воздействий по предотвращению аварийных комбинаций событий, установление числовых характеристик влияния, оказываемого внешними факторами на систему, установление условий возникновения аварийных комбинаций событий, связанных с этими факторами и др.

3 Разработка гибридных моделей системной динамики

В качестве уравнений системной динамики традиционно используются дифференциальные уравнения, которые строятся на основе графов и матриц зависимостей переменных и внешних факторов. Однако существует ряд предпосылок для использования разностных уравнений вместо дифференциальных. В силу разнообразия человеко-машинных, организационно-технических систем и их среды решающими факторами в пользу выбора разностных уравнений может быть наличие в системах уравнений для переменных системы или внешних факторов функции, вычисление которых зависит от определенных условий, или переменных с различным шагом изменений или измерений.

Наличие функции, вычисление которых зависит от определенных условий, отражает изменчивость самой модели в зависимости от обстоятельств; такие функции могут быть разрывными и нарушать известные условия разрешимости систем дифференциальных уравнений, так же, как и функции с дискретным, в частности, конечным, множеством значений.

Переменные с различным шагом изменений или измерений означают использование модели как с быстроменяющимися переменными, так и с переменными, значения которых измеряется как итог на достаточно больших отрезках времени. Такими переменными могут быть макроэкономические показатели, например, ВВП. Промежуточные значения таких показателей, как правило, не рассматриваются и достаточной для отчетов и анализа считается информация на концах упомянутых отрезков. Соответствующие значения из статистики используются и для проверки адекватности построенных моделей, их пригодности для анализа возможных ситуаций в прошлом (экстраполяция) и будущем (интерполяция). Поэтому в итоге в качестве результатов моделирования было бы неправомерно предлагать конкретные непрерывные кривые с информацией о динамике рассматриваемых показателей внутри меньших интервалов времени. Такие кривые, если они показываются, могут иметь преимущественно иллюстративное предназначение и служить удобству восприятия, например, нескольких графиков на одной плоскости.

В силу обозначенных причин описание системной динамики подобных процессов с использованием дифференциальных уравнений вызывает существенные вопросы по объяснительной части самих таких моделей и корректности известных методов решения дифференциальных уравнений для таких уравнений. В этом случае мы считаем более правильным использование модели системной динамики с разностными уравнениями. Для переменных, которые изменяются или измеряются дискретно, одним из вариантов реализации этого подхода являются уравнения следующего общего вида:

$$s_i(t+1) - s_i(t) = \alpha_i^+ \Pi_i^+(t) \Sigma_i^+(t) - \alpha_i^- \Pi_i^-(t) \Sigma_i^-(t), \quad (1)$$

где $\Pi_i^+(t)$ – произведение переменных системы, которые в соответствии с предполагаемыми причинно-следственными связями увеличивают значения переменной $S_i(t)$; $\Sigma_i^+(t)$ – сумма внешних

факторов, которые увеличивают $S_i(t)$; $\Pi_i^-(t)$ – произведение переменных системы, которые уменьшают $S_i(t)$; $\Sigma_i^-(t)$ – сумма внешних факторов, которые уменьшают значение переменной $S_i(t)$, $i = 1, \dots, n$, α_i^+ , α_i^- – коэффициенты модели. Для определения конкретных коэффициентов уравнений также используются методы корреляционно-регрессионного анализа и анализа временных рядов.

В случае, когда переменные и внешние факторы системы имеют различные шаги изменения или измерения, мы можем вместо (1) записать более общее выражение. Пусть шаги изменения или измерения рассматриваемых переменных $X_1(t), \dots, X_n(t)$ и внешних факторов $P_1(t), \dots, P_m(t)$ исследуемой системы составляют $\Delta_1, \dots, \Delta_n, \Delta_{n+1}, \dots, \Delta_{n+m}$ единиц модельного времени соответственно. Тогда модель динамики каждой из этих переменных S_i можно записать в виде

$$S_i(t+\Delta_i) = F_i(S_1(t_{i,1}), \dots, S_i(t), \dots, S_n(t_{i,n}), P_1(t_{i,n+1}), \dots, P_m(t_{i,n+m})), \quad (2)$$

где $t_{i,j}$ – наибольший момент времени вида $t_{i,j}=k\Delta_j$ такой, что $t_{i,j} \leq t+\Delta_i$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n+m$, F_1, \dots, F_n – функции, значения которых определяются тем или иным способом в зависимости выполнения ряда условий. Эти условия могут быть связаны с самим значением $t+\Delta_i$, значениями рассматриваемых переменных и внешних факторов в прошлые моменты времени.

При проведении имитационного моделирования с использованием систем уравнений вида (2) значения переменных системы определяются в моменты времени из множества $\{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n, 2\Delta_1, 2\Delta_2, \dots, 2\Delta_n, \dots\}$ в порядке расположения этих значений на числовой оси. При этом если очередной период времени Δ_n для переменной X_i еще не пройден, ее значение остается равным определенному ранее, а для определения очередного значения каждой переменной $X_i(k\Delta_i)$ используются значения других переменных в более ранние моменты также и в случаях, когда шаг моделирования у этих переменных отличается от Δ_i .

Наличие в системе дискретных переменных с различным шагом изменения не исключает возможности и анализа переменных, поведение которых представлено обыкновенными дифференциальными уравнениями. Однако, чтобы решать эти уравнения соответствующими методами, в исходной системе должны быть выделены подсистемы, которые на определенных отрезках исследуемого интервала будут удовлетворять требуемым для решения условиям.

При оценке точности описанных выше моделей системной динамики с различным шагом изменения переменных представляется целесообразным использовать известные формулы для определения точности: WAPE (Weighted Absolute Percent Error), RMSE (Root Mean Square Error) и др. Однако при этом количество точек сравнения у различных переменных будут различным в силу разности шага, как и точность модели по различным переменным. В этом случае вопрос адекватности (достаточной точности) модели должен решаться в зависимости от того, насколько удовлетворительна точность по основным исследуемым переменным и насколько сильна зависимость этих переменных от остальных с невысокой точностью или небольшим количеством точек сравнения. При этом в целом на фиксированных наборах статистики модели системной могут быть доведены до достаточно высокой точности. А при развитии событий, вступлении новых факторов (например, пандемии коронавирусной инфекции) модели системной динамики в любом случае будет нуждаться в коррекции.

Заключение

Для поддержки разработки и реализации стратегии снижения углеродного следа предлагается концепция построения гибридных моделей динамики крупномасштабных человеко-машинных и организационно-технических систем с различным шагом и условиями изменения переменных. Предполагается, что при имитационном моделировании каждая из таких переменных должна изменяться в своём режиме, но в зависимости от ранее сохраненных значений других переменных. Такой подход позволяет объединять в рассмотрении в одной модели переменные различного характера и происхождения.

Литература

1. Макаров И.А. Глобальное изменение климата как вызов мировой экономике и экономической науке. – Экономический журнал ВШЭ, 2013, №3. – С.479-496.
2. Умнов В.А., Коробова О.С., Скрябина А.А. Углерод. – Вестник РГГУ. Серия «Экономика. Управление. Право», 2020, № 2. – С. 85–93.
3. Смирнова В.Е., Орлеанская Е.С. Экологический след как индикатор устойчивости развития цивилизации. – Безопасность в техносфере, 2012, № 2. – С.13–16.
4. Балашов Н.А., Годван Д.Ф. Углеродный след: как государства и компании пытаются его уменьшить. – Бизнес-образование в экономике знаний, 2020, №3 (17). – С.17-19.

5. *Балаиов М.М.* Влияние механизмов углеродного регулирования на развитие промышленности Российской Федерации. – СРРМ, 2020, №4. – С.354-365.
6. *Поддубный В.В., Бахтина К.В., Кривошеина Т.В.* Субоптимальное управление системой, описываемой стохастической моделью мировой динамики Форрестера. – Вестн. Том. гос. ун-та. 2003, №280. – С.145-155.
7. *Маленков Ю.А.* Причинно-следственные модели в стратегическом планировании. – Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2011, Серия 5, №2. – С.116-129.
8. *Форрестер Дж.* Основы кибернетики предприятия. – М: Прогресс. 1971. – 340 с.
9. *Форрестер Дж.* Динамика развития города. – М.: Прогресс, 1974. – 281 с.
10. *Meadows D.L.* Toward Global Equilibrium; Collected Papers. – Cambridge, Mass. Whrihgt Allen Press Inc., 1973
11. *Лычкина Н.Н.* Ретроспектива и перспектива системной динамики. Анализ динамики развития. – Бизнес-информатика. 2009, № 3. – С. 55–67.
12. *Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю.* Минимизация ущерба от нарушения технологического процесса в сварочных роботизированных технологических комплексах. – Мехатроника, автоматизация, управление. 2017, Т. 18, № 5. – С. 328–332.
13. *Клюев В.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Богомолов А.С., Иващенко В.А., Филимонюк Л.Ю., Хамутова М.В.* Информационно-управляющая система для поддержки принятия решений по ликвидации последствий наводнений. – Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016, № 11 (149) . – С. 39–45.
14. *Yandybaeva N., Rezchikov A., Kushnikov V., Ivaschenko V., Kushnikov O., Tsvirkun A.* Mathematical Models, Algorithms and Software Package for the National Security State of Russia. – Studies in Systems, decision and control. 2019, 199. – pp. 646–659.
15. *Bogomolov A. S., Rezchikov A. F., Kushnikov V. A., Ivashchenko V. A., Filimonyuk L. Yu., Yandybaeva N. V., Fominykh D. S., Kovaleva N. N., Soldatkina O. L., Berdnova E. V. and Kalikinskaya E. Yu.* Mathematical Modeling of Dynamics of Crime Indicators in the Field of Computer Information. – Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020, 1226. – pp. 191–200.