

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ ЗАПАСА И ПОТОКА¹

Ратнер С. В.²,

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Разрабатывается подход к решению задач экологического анализа среды функционирования для производственных объектов, чья деятельность характеризуется множеством переменных двух разных типов – переменных запаса и переменных потока. Изучаются ограничения, дополнительно накладываемые на свойства множества производственных возможностей. Предлагается постановка задачи для оценки сравнительной эффективности региональных систем экологического менеджмента, функционирующих на определенном временном интервале. Приводится расчетный пример для оценки сравнительной эффективности систем экологического менеджмента регионов Центрального Федерального округа в период с 2010 по 2014 гг. Обсуждаются возможности использования разработанного метода на практике.

Ключевые слова: анализ среды функционирования, динамические модели, экологическая эффективность, региональная экономика, экологический менеджмент.

1. Введение

В последние годы экологический анализ среды функционирования (в англоязычных источниках Environmental Data Envelopment Analysis, E-DEA) активно развивается в работах зарубежных [11–12, 16–18, 20–21] и российских ученых [6–7] как перспективный подход, позволяющий успешно решать комплексные задачи управления, связанные с переводом экономических систем на устойчивый путь развития, обеспечивающий экономический рост при максимально бережном потреблении природных ресурсов и минимально возможной нагрузке на

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-06-00147_а «Разработка моделей анализа среды функционирования для оптимизации траекторий развития региональных экономических систем по экологическим параметрам».

² Светлана Валерьевна Ратнер, д.э.н. (lanarat@mail.ru).

окружающую среду. В отличие от традиционного анализа среды функционирования (DEA), в моделях E-DEA производственные объекты могут иметь не только желательные выходы, в качестве которых, как правило, рассматриваются различные виды производимой полезной продукции (или ценности, создаваемые предприятием в том случае, если оно не является производством в обычном понимании), но и нежелательные выходы, сопутствующие основному производственному процессу. Обычно в качестве нежелательных выходов рассматриваются негативные экологические эффекты производственной (или любой другой экономической) деятельности предприятия. Наличие нежелательных выходов существенно усложняет решение задач анализа среды функционирования (АСФ), так как нарушает одно из основных свойств множества производственных возможностей (Production Possibility Set, PPS) P , а именно свойство монотонности. Подробнее с данной проблемой можно ознакомиться в работах [8, 14], а также монографии [1].

В серии недавних работ автора с ближайшими коллегами и учениками [3–5] было показано, что в широком классе практических задач экологического менеджмента возможно использование моделей экологического АСФ в упрощенной постановке, когда нежелательные выходы производственной деятельности изучаемых однородных экономических агентов рассматриваются в базовых моделях АСФ как входы. При таком подходе логика решаемой оптимизационной задачи полностью сохраняется: виртуальный вход (взвешенная линейная композиция входов) минимизируется, а виртуальный выход (взвешенная линейная композиция выходов) производственного объекта максимизируется. Кроме того, такой подход к работе с нежелательными выходами позволяет сохранить свойство строгой монотонности множества производственных возможностей. В результате решения оптимизационной задачи АСФ эффективными признаются те производственные объекты (или системы), которые при максимальном объеме выпуска полезной продукции производят наименьшее негативное воздействие на окружающую среду.

При рассмотрении «статических» случаев, т.е. задач управления эколого-экономической эффективностью производственных объектов, тот факт, что объект признан эффективным, чаще

всего говорит о том, что он использует наилучшие доступные на текущем уровне технологического развития производственные технологии и имеет эффективную систему экологического менеджмента. Для неэффективных объектов вычисляются целевые значения входов (в случае задачи ориентированной по входам, input-oriented) или выходов (в случае задачи ориентированной по выходам, output-oriented), достижение которых позволит им стать эффективными.

При этом варианты возможного достижения целевых параметров на практике у каждого производственного объекта могут быть разными: это может быть модернизация производства, введение системы экологического менеджмента на предприятии, реализация инвестиционных проектов природоохранного характера и т.д. В том же случае, когда задача экологического АСФ решается для таких сложных и масштабных объектов как региональные экономические системы, характеризующиеся большим разнообразием производственных процессов, продвижение к границе эффективности может происходить, в том числе, и за счет изменения структуры региональной экономики, отказу от ресурсоемких и «грязных» производств в пользу развития наукоемких секторов экономики. Очевидно, что все вышеперечисленные процессы, имеющие своей целью повышение эколого-экономической эффективности производственного объекта, распределены во времени и не имеют мгновенного эффекта, поэтому с точки зрения практики особый интерес представляют продвинутые методы АСФ, позволяющие исследовать вопросы сравнительной эффективности их деятельности в динамике.

В большинстве литературных источников, посвященных изучению особенностей динамических задач анализа среды функционирования, подчеркивается тот факт, что изменение значений меры эффективности производственного объекта в течение наблюдаемого периода времени может быть обусловлено, как непосредственно изменением его производительности, так и смещением границы эффективности, вызванного изменениями в производительности других производственных объектов референтного множества [13, 15, 19].

Для преодоления сложностей интерпретации динамики коэффициента эффективности предлагаются два основных подхода, один из которых основан на разложении коэффициента эффективности на две составляющие (относительно границы эффективности предшествующего и наблюдаемого момента времени) [13], а второй предполагает рассмотрение одного и того же производственного объекта в разные моменты времени, как разные производственные объекты [19]. При этом ни в первом, ни во втором подходе не учитываются такие важные особенности широкого класса производственных процессов, как наличие отложенного эффекта от использования какого-либо ресурса (например, от инвестиций в исследования и разработки) или использование ресурсов, накопленных за предшествующие периоды жизненного цикла производственного объекта (например, расходование средств фондов развития) (рис. 1).



Рис. 1 Экономическая логика распределенного во времени эффекта от использования ресурса

Первые попытки преодолеть данные недостатки динамических моделей анализа среды функционирования предприняты в [15], где предлагается учитывать тип переменных, используемых в модели АСФ в качестве входов, и работать с переменными типа запаса специальным образом: рассматривать их как отдельный вход в первый момент времени и как выход в последний момент времени из всего наблюдаемого периода (окна траектории производственного объекта).

При данном подходе необходимо также осуществить переход от рассмотрения эффективности производственного объекта в каждый определенный момент времени к изучению *пути* развития производственного объекта. Такие модификации метода анализа среды функционирования изменяют постановку оптимизационной задачи и, что самое главное, накладывают определённые дополнительные ограничения на свойства множества производственных возможностей, несовместимые с некоторыми постулатами экологического АСФ, в частности с постулатом нестрогой монотонности.

Целью настоящей работы является адаптация подхода, предложенного в работе [10] к решению задач традиционного АСФ для производственных объектов, чья деятельность характеризуется множеством переменных двух разных типов – переменных запаса и переменных потока, к задачам экологического АСФ. Изучаются ограничения, которые необходимо дополнительно наложить на свойства множества производственных возможностей. Предлагается постановка задачи для оценки сравнительной эффективности региональных систем экологического менеджмента, функционирующих на определенном временном интервале. Приводится расчетный пример для оценки сравнительной эффективности систем экологического менеджмента регионов Центрального Федерального округа в период с 2010 по 2014 гг.

2. Свойства множества производственных возможностей в динамических моделях анализа среды функционирования с переменными типа запаса и типа потока

Фундаментальным свойством моделей DEA является соответствие между входами и выходами производственных объектов в каждый рассматриваемый момент времени. Для того чтобы учесть распределенное по времени влияние входов на выходы, необходимо внести некоторые изменения в определение множества производственных возможностей (Production Possibility Set, PPS) модели DEA.

Следуя подходу, предложенному в [10], обозначим через $(x_j^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T})$ оцениваемую траекторию (или путь развития)

j -го ПО ($j = 1, 2, \dots, M$). Тогда рассматриваемому множеству производственных возможностей P

$$P = \{(x_j^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T}) \mid x_j^{1,2,\dots,T} \text{ могут произвести } y_j^{1,2,\dots,T}\}.$$

будут присущи следующие свойства:

1) P непустое множество. Все наблюдаемые траектории $(x_j^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T})$, $j = 1, 2, \dots, N$, составляют P ;

2) P является строго монотонным по входам, т.е. если $(x_j^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T}) \in P$ и $\mathbf{x}^{1,2,\dots,T} \geq x_j^{1,2,\dots,T}$, то $(\mathbf{x}^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T}) \in P$, где $\mathbf{x}^{1,2,\dots,T} \geq x_j^{1,2,\dots,T}$, понимается как $\mathbf{x}^t \geq x_j^t$ для $t = 1, 2, \dots, T$ и $\mathbf{x}^t \geq x_j^t$ обозначает, что хотя бы один элемент \mathbf{x}^t больше, чем соответствующий элемент x_j^t .

3) P является строго монотонным по выходам, т.е. если $(x_j^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T}) \in P$ и $\mathbf{y}^{1,2,\dots,T} \leq y_j^{1,2,\dots,T}$, то $(\mathbf{x}^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T}) \in P$.

4) Если $y_j^{1,2,\dots,T} \geq 0$, то $(0, y_j^{1,2,\dots,T}) \notin P$ (на один выход не может быть произведен без входа).

5) Постоянный эффект масштаба: если $(x_j^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T}) \in P$, то $\forall \lambda > 0 (\lambda x_j^{1,2,\dots,T}, \lambda y_j^{1,2,\dots,T}) \in P$;

6) P является наименьшим замкнутым выпуклым множеством, удовлетворяющим условиям (1)–(5).

Множество производственных возможностей, которое удовлетворяет условиям (1)–(5) может быть построено из всех наблюдаемых путей $(x_j^{1,2,\dots,T}, y_j^{1,2,\dots,T})$, $j = 1, 2, \dots, N$, следующим образом:

$$P = \left\{ (x^{1,2,\dots,T}, y^{1,2,\dots,T}) \mid x^{1,2,\dots,T} \geq \sum_j \lambda_j x_j^{1,2,\dots,T}; y^{1,2,\dots,T} \leq \sum_j \lambda_j y_j^{1,2,\dots,T}; \lambda_j > 0 \right\}.$$

Далее при построении множества производственных возможностей необходимо выделить тот факт, что объем запаса, оставшийся у производственного объекта на конечный момент наблюдаемого временного периода, может быть использован в его дальнейших периодах жизненного цикла для увеличения выходов (объемов полезной продукции). Для этого явным образом выделим переменную, имеющую тип запаса и будем рассматривать ее в начальный момент оцениваемого периода, внутри оцениваемого периода времени и в конечный момент оцениваемого периода времени (рис. 2):

$Z^{\tau-1}$ – значение переменной запаса в начальный момент оцениваемого временного окна $\tau, \tau + 1, \dots, \tau + T$;
 $z^{\tau, \tau+1, \dots, \tau+T}$ – изменения значения переменной запаса в каждый момент времени из оцениваемого временного окна;
 $Z^{\tau+T}$ – значение переменной запаса в конечный момент оцениваемого временного окна.

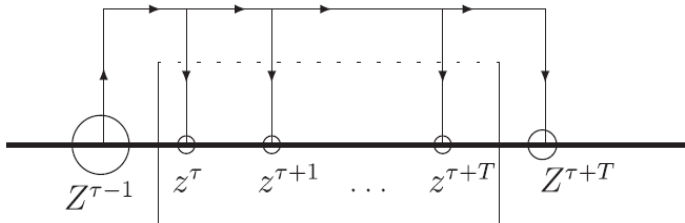


Рис. 2. Иллюстрация основного принципа учета переменной запаса в динамической модели АСФ

Очевидно, что, следуя общей логике моделей анализа среды функционирования, $Z^{\tau-1}$ должно рассматриваться как вход (подлежать минимизации в задачах, ориентированных на входы, input-oriented), а $Z^{\tau+T}$ – как выход (подлежать максимизации в задачах, ориентированных по выходу, output-oriented). Тогда производственные объекты, обладающие наименьшими запасами в начальный момент времени и наибольшими запасами в конечный момент времени, при прочих равных условиях будут признаны наиболее эффективными. Рассматривая $z^{\tau, \tau+1, \dots, \tau+T}$ так же, как входы, получим следующее определение множества производственных возможностей:

$$\begin{aligned}
 P = & \left\{ (x^{\tau, \dots, \tau+T}, z^{\tau, \dots, \tau+T}, y^{\tau, \dots, \tau+T}) \mid \right. \\
 (1) \quad & x_i^t \geq \sum_j \lambda_j x_{ij}^t; \quad z_i^t \geq \sum_j \lambda_j z_{ij}^t; \quad y_i^t \leq \sum_j \lambda_j y_{ij}^t \\
 & \forall t = \tau, \dots, \tau + T \\
 & \left. Z_i^{\tau-1} \geq \sum_j \lambda_j Z_{ij}^{\tau-1}; \quad Z_i^{\tau+T} \leq \sum_j \lambda_j Z_{ij}^{\tau+T}, \quad \forall \lambda_j \geq 0 \right\}.
 \end{aligned}$$

Содержательно данное определение множества производственных возможностей означает, что если в каждый момент времени θ определенный объем полезных выходов y_i может быть произведен на основе использования некоторого фиксированного количества входных ресурсов x_i и запаса $Z^{\tau-1}$ и $z^{\tau, \tau+1, \dots, \tau+\theta}$, то этот же объем полезных выходов может быть произведен и при большем объеме используемых ресурсов и запасов. То есть свойство строгой монотонности распространяется и на все значения переменной запаса.

Заметим, что определение (1) может быть легко обобщено на случай, когда экономическая активность производственных объектов характеризуется использованием не одной, а сразу нескольких переменных запаса. В таком обобщенном случае каждое начальное значение и все промежуточные значения учитываемых переменных запаса должны рассматриваться как входы, а все конечные значения переменных запаса – как выходы.

3. Постановка задачи для оценки сравнительной эффективности путей развития производственных объектов с переменными запаса и потока

Рассмотрим прямую форму модели CCR [9], ориентированной по входам, с радиальной мерой эффективности для случая задачи оценки сравнительной эффективности траекторий производственного объекта с индексом 0 в присутствии одной или нескольких переменной типа запаса:

$$(2) \quad \text{Min} \frac{\sum_{t=\tau}^T \alpha^t}{T} - \varepsilon \left(\sum_{t=\tau}^{\tau+T} \sum_{i=1}^M S_i^{t-} + \sum_{t=\tau}^{\tau+T} \sum_{i=1}^L \delta_i^{t-} + \sum_{t=\tau}^{\tau+T} \sum_{r=1}^R S_r^{t+} + \sum_{i=1}^K \gamma_i^- + \sum_{i=1}^K \gamma_i^+ \right)$$

при ограничениях

$$U1: \sum_{j=1}^N \lambda_j x_{ij}^t = \alpha^t x_{ij0}^t - S_i^{t-} \quad \forall i = \overline{1, M} \quad \forall t = \overline{\tau, T},$$

$$У2: \sum_{j=1}^N \lambda_j z_{ij}^t = \alpha^t z_{ij0}^t - \delta_i^{t-} \quad \forall i = \overline{1, L} \quad \forall t = \overline{\tau, T},$$

$$У3: \sum_{j=1}^N \lambda_j y_{rj}^t = y_{rj0}^t + S_r^{t+} \quad \forall i = \overline{1, R} \quad \forall t = \overline{\tau, T},$$

$$У4: \sum_{j=1}^N \lambda_j Z_{ij}^{\tau+T} = Z_{ij0}^{\tau+T} + \gamma_i^+ \quad \forall i = \overline{1, L},$$

$$У5: \sum_{j=1}^N \lambda_j Z_{ij}^{\tau-1} = Z_{ij0}^{\tau-1} - \gamma_i^- \quad \forall i = \overline{1, L};$$

где все $\lambda_j, S_i^{t-}, \delta_i^{t-}, S_r^{t+}, \gamma_i^+, \gamma_i^-$ – неотрицательные величины, M – количество входов ПО, определяемых как переменные потока, L – количество входов, определяемых как переменные запаса, R – количество выходов ПО, определяемых как переменные потока, N – общее количество ПО в референтном множестве.

Нетрудно заметить, что ограничение У1 является условием, накладываемым на входные переменные типа потока, ограничение У2 накладывается на промежуточные значения переменных типа запаса, У3 является ограничением для выходных переменных типа потока, У4 и У5 являются ограничениями, накладываемые соответственно на начальное и конечное значение переменных типа запаса.

Общая эффективность производственного объекта на рассматриваемом временном интервале определена как среднее арифметическое всех значений коэффициентов эффективности за рассматриваемый временной промежуток.

Решение задачи (2) определяет траекторию (x_i^t, y_r^t) из множества P , такую что

$$x_i^t = \sum_{j=1}^N \lambda_j^* x_{ij}^t = \phi_i^* x_{ij0}^t - \delta_i^{t-*},$$

$$(3) \quad z_l^t = \sum_{j=1}^N \lambda_j^* z_{lj}^t = \phi_l^* z_{lj0}^t - \delta_l^{t-*},$$

$$y_r^t = \sum_{j=1}^N \lambda_j^* y_{rj}^t = y_{rj0}^t + S_r^{t+*},$$

$$i = \overline{1, M}; \quad r = \overline{1, R}; \quad l = \overline{1, L}; \quad t = \overline{\tau, T}.$$

Заметим, что в формуле (2) предложено рассчитывать коэффициент эффективности пути развития производственного объекта как среднее арифметическое коэффициентов эффективности в каждый момент времени из наблюдаемого интервала. На практике использование такого усреднённого показателя может привести к потере информативности. Например, два объекта с одинаковой итоговой мерой эффективности могут иметь разные пути: один производственный объект может наращивать свою эффективность при продвижении от момента τ к моменту времени T , а другой, наоборот, терять. Очевидно, что первый случай является более предпочтительным, так как существует определенная вероятность сохранения той же динамики развития производственного объекта в будущем. Поэтому представляется целесообразным использовать другие средние значения, например, среднее геометрическое или среднее гармоническое. Однако использование более сложных конструкций средних значений может вести к повышению вычислительной сложности оптимизационной задачи (2).

4. Постановка задачи для оценки сравнительной эффективности региональных систем экологического менеджмента на временном промежутке

В отличие от задач оценки сравнительной эколого-экономической эффективности региональных экономических систем, постановка и решение которых описаны в работах [3, 4], задачи оценки эффективности региональных систем

экологического менеджмента должны учитывать не только степень «экологичности» экономики региона, но и эффективность различного рода мероприятий, направленных на улучшение состояния окружающей среды. Это означает, что помимо различных негативных экологических эффектов, производимых региональной экономикой и сектором ЖКХ, являющихся, по сути, нежелательными выходами производственных процессов и рассматриваемых в задачах экологического АСФ как входы, в модели должны появиться и другие входы, отображающие ресурсы, затрачиваемые на экологические инновации и природоохранные мероприятия. То есть логика задачи оценки эффективности приобретает схему, представленную на рис. 3.

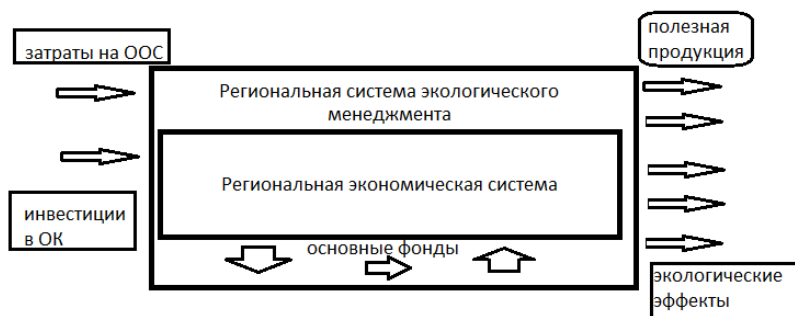


Рис. 3 Логика построения оптимизационной задачи для оценки эффективности региональной системы экологического менеджмента

На рис. 3 в прямоугольник заключены входы и выходы производственного объекта (представляющего в данном случае региональную систему экологического менеджмента), подлежащие минимизации, а в прямоугольник с закругленными углами – выходы, подлежащие максимизации. Региональная система экологического менеджмента представлена как надстройка (точнее, оболочка) для региональной экономической системы. Это отражает тот факт, что результаты деятельности системы

экологического менеджмента не могут рассматриваться отдельно, в отрыве от деятельности самой экономической системы.

Входная переменная «затраты на охрану окружающей среды», вообще говоря, может рассматриваться как вход непосредственно системы экологического менеджмента, а переменная «инвестиции в основной капитал» – как вход экономической системы региона, однако, следуя логике АСФ, рассматривающего производственные объекты как систему типа «черный ящик», такое разделение не является необходимым и представлено на схеме только для иллюстрации предлагаемого подхода к постановке задачи.

Необходимо отметить, что на рис. 3 также представлена одна переменная, которая заключена внутри прямоугольника, обозначающего региональную систему экологического менеджмента. Эта переменная отражает стоимость основных фондов и является по своему типу переменной запаса. Учет чисто экономических параметров, таких как инвестиции в основной капитал в региональной экономике и стоимость основных фондов, не имеющих прямого отношения к вопросам экологии, позволяет адекватно отразить влияние (как правило, положительное) на окружающую среду модернизационных процессов, зачастую основанных в современной экономической ситуации на внедрении более энергоэффективных и менее ресурсоемких технологий.

Тогда, следуя представленной на рис. 3 логике и схеме постановки оптимизационной задачи, рассмотренной в предыдущем параграфе, введем следующие наборы выходных и выходных переменных:

x_{1j}^t – выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от автомобильного транспорта в году t , тыс. тонн;

x_{2j}^t – выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников в году t , тыс. тонн;

x_{3j}^t – сброс неочищенных сточных вод в природные водоемы в году t , млн куб. м;

x_{4j}^t – забор воды из природных водоемов в году t , млн куб. м;

x_{5j}^t – инвестиции в основной капитал в году t , млн руб.;

x_{6j}^t – текущие затраты на охрану окружающей среды в году t , млн руб.;

$Z^{\tau-1}$ – стоимость основных фондов в регионе на начало оцениваемого периода, млн. руб.;

$z^{\tau, \tau+1, \dots, \tau+T}$ – стоимость основных фондов в регионе в рассматриваемый период, млн руб.;

$Z^{\tau+T}$ – стоимость основных фондов на конец рассматриваемого периода, млн руб.;

y_{1j}^t – валовый региональный продукт в году t , млн руб.;

y_{2j}^t – население региона в году t , тыс. чел.

Решение данной оптимизационной задачи позволит выделить те региональные системы экологического менеджмента, которые позволяют экономике региона производить наименьшие негативные воздействия на окружающую среду при наибольшем объеме производимого ВРП и количестве населения за счет наиболее эффективного использования текущих затрат на охрану окружающей среды, инвестиций в основной капитал и максимального накопления стоимости основных фондов. То есть по сравнению с постановками задачи, предложенными в работах [3–4], данный подход позволяет не только оценить эффективность региональных экономических систем в экологическом плане, но и понять, за счет чего она достигнута.

Следует отметить, что при использовании модели (2) и множества производственных возможностей вида (1) учет нежелательных выходов через работу с ними как с входами производственных объектов является *единственным* возможным подходом, так как свойства множества P включают свойство монотонности по входам и выходам.

Рассмотрим вопрос о том, насколько предложенный подход адекватно отражает ситуацию эколого-экономической эффективности траекторий развития региональных систем на примере регионов Центрального федерального округа, как территориальных объектов с наиболее высокой плотностью населения и уровнем воздействия экономики на окружающую среду. Выбор

периода наблюдения с 2010 по 2014 гг. позволит сравнить полученные результаты с результатами расчетов коэффициентов эколого-экономической эффективности региональных экономических систем, выполненных в работе [2] без учета переменной запаса, и сделать выводы относительно информативности предложенного в настоящей работе подхода.

5. Оценка сравнительной эффективности систем экологического менеджмента регионов Центрального Федерального округа в период с 2010 по 2014 гг.

Исходные статистические данные для расчетов взяты из статистического ежегодного сборника «Регионы России. Социально-экономические показатели» за 2012–2017 гг. (www.gks.ru) и из ежегодных государственных докладов Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации «О состоянии и об охране окружающей среды в российской Федерации» за период 2010-2014 гг. (<http://www.mnr.gov.ru>). Так как в расчетах используются данные за временной период 5 лет, представленные в денежном выражении, предварительно все стоимостные величины методом цепных индексов были приведены к ценам базового периода, в качестве которого взят 2010 год.

В результате последовательного решения четырех задач ССР¹, ориентированных по входам и одной задачи ССР, ориентированной по выходам, получены значения коэффициентов эффективности представленные в таблице 1.

Как показывают проведенные расчеты, 10 из 17 рассмотренных регионов демонстрируют на всем наблюдаемом временном интервале максимальную эффективность в сфере экологического менеджмента. Это Белгородская, Брянская, Владимирская, Ивановская, Калужская, Костромская, Курская, Московская, Орловская и Тамбовская области. К неэффектив-

¹ Аббревиатура ССР широко используется в литературе по анализу среды функционирования для обозначения класса моделей с постоянным эффектом масштаба. Введена по первым буквам имен разработчиков Chames, Cooper, Rhodes.

ным регионам отнесены Воронежская, Липецкая, Рязанская, Смоленская, Тверская, Тульская и Ярославская области. Причем наименьшую эффективность в плане экологического менеджмента демонстрируют Тульская и Липецкая области.

Таблица 1. Коэффициенты эффективности систем экологического менеджмента регионов ЦФО в 2010–2014 гг.

Регион	2010	2011	2012	2013	2014	$\alpha_{геом}$	$\alpha_{арифм}$
Белгородская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Брянская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Владимирская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Воронежская обл.	0,969	0,937	0,950	0,908	0,934	0,940	0,940
Ивановская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Калужская область	1	1	1	1	1	1	1
Костромская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Курская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Липецкая обл.	0,878	0,851	0,826	0,832	1	0,875	0,877
Московская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Орловская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Рязанская обл.	0,900	0,970	0,973	0,889	1	0,945	0,946
Смоленская обл.	0,952	0,945	0,971	1	1	0,973	0,974
Тамбовская обл.	1	1	1	1	1	1	1
Тверская обл.	0,862	0,831	0,903	0,947	0,967	0,901	0,902
Тульская обл.	0,849	0,840	0,814	0,812	0,876	0,838	0,838
Ярославская обл.	0,799	0,854	0,925	0,984	1	0,909	0,913

Заметим, что общий коэффициент эффективности за рассматриваемый период был рассчитан и как среднее арифметическое однолетних показателей, и как среднее геометрическое. В данном случае особой разницы между ними не наблюдается, поэтому будем использовать наиболее простой – среднее арифметическое – как показатель эффективности пути развития региона в контексте баланса экономики и экологии.

Для сравнения полученных результатов с результатами расчетов эколого-экономической эффективности, выполненных без учета стоимостных входов (переменной типа запаса, отражающей стоимость основных фондов и переменной, ответственной за инвестиции в основной капитал), приведем таблицу из [2].

Таблица 2. Значения коэффициентов эколого-экономической эффективности регионов ЦФО, рассчитанные точечным методом без учета стоимостных входов. Источник: [2]

Регион	2010	2011	2012	2013	2014
Белгородская обл.	1	1	1	1	1
Брянская обл.	1	1	1	1	1
Владимирская обл.	1	1	1	1	1
Воронежская обл.	1	1	1	1	1
Ивановская обл.	0,7868	0,7868	0,8301	0,8548	0,7969
Калужская обл.	1	1	1	1	1
Костромская обл.	1	0,9126	0,9124	0,8283	0,8710
Курская обл.	1	1	1	1	1
Липецкая обл.	1	1	1	1	1
Московская обл.	1	1	1	1	1
Орловская обл.	0,9807	0,9733	1	0,9509	1
Рязанская обл.	0,8022	0,7974	0,7460	0,7372	0,6928
Смоленская обл.	0,9086	0,9839	0,8283	0,8209	0,9445
Тамбовская обл.	1	1	1	1	1
Тверская обл.	1	1	1	1	1
Тульская обл.	0,8579	0,8136	0,7896	0,6681	0,6258
Ярославская обл.	0,9164	0,9452	0,9292	1	1

Опуская некоторые малозначительные моменты, основные различия в результатах работы [2] и настоящей работы можно подытожить следующим образом:

1) Воронежская, Липецкая и Тверская области признаны эффективными на всем временном промежутке без учета стоимостных входов (назовем условно данную модель моделью А), тогда как в случае учета переменной типа запаса и стоимостного входа, отражающего инвестиции в основной капитал (модель В), они перестают быть эффективными;

2) Ивановская, Костромская и Орловская области признаны неэффективными без учета стоимостных входов (модель А), в то время как с учетом стоимостных входов (модель В) они демонстрируют максимальную эффективность.

Для того чтобы дать выявленным различиям обоснованную экономико-управленческую интерпретацию, рассмотрим более детально динамику экономических и экологических показателей в нескольких регионах – представителях разных типов региональных систем экологического менеджмента: Владимирской области – как региона, признанного эффективным по результатам расчетов по обеим моделям (с учетом стоимостных входов и без такового), Воронежской области – как региона, признанного эффективным по модели без учета стоимостных входов и неэффективным с учетом таковых и Ивановской области – как региона, признанного неэффективным по модели без учета стоимостных входов и эффективным с учетом таковых. На рис. 4–7 представлена динамика некоторых «наиболее говорящих» входных и выходных параметров модели.

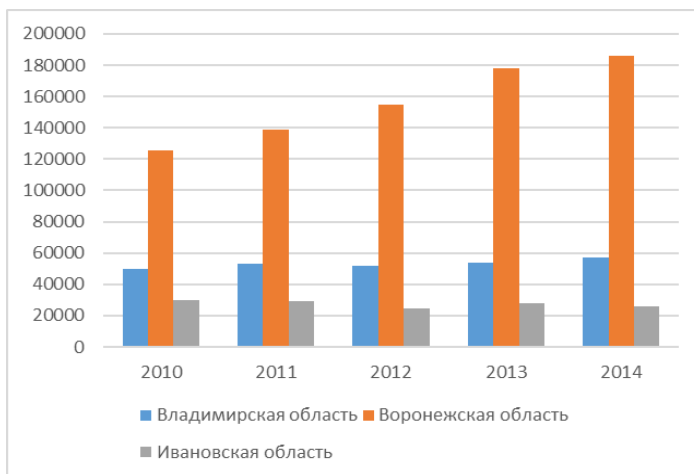


Рис. 4 Динамика инвестиций в основной капитал (млн руб. в ценах 2010 года) в модельных регионах

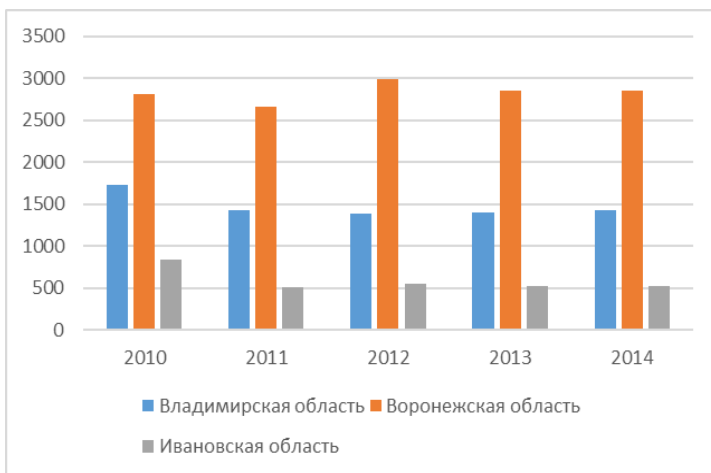


Рис. 5 Динамика текущих затрат на охрану окружающей среды (млн руб. в ценах 2010 года) в модельных регионах

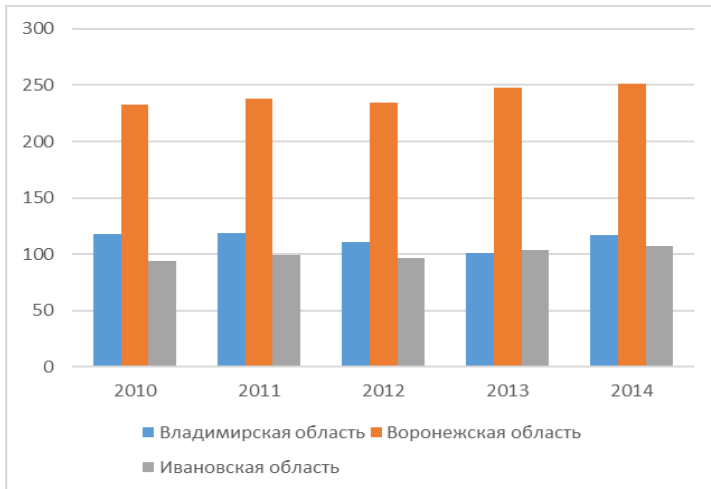


Рис. 6 Динамика выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта (тыс. тонн) в модельных регионах

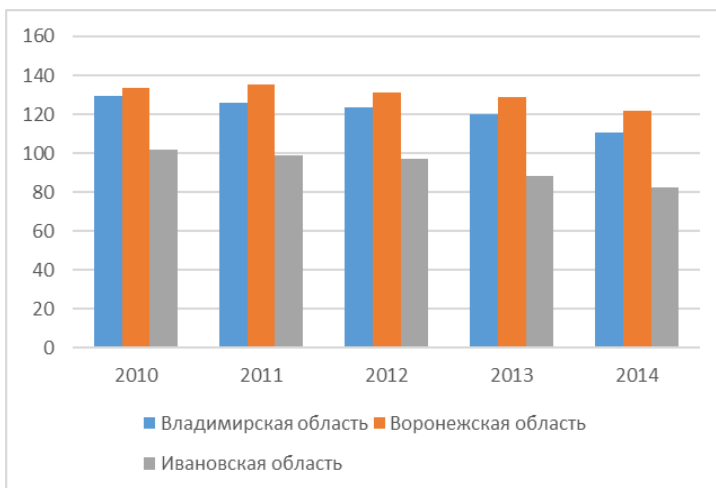


Рис. 7 Динамика сброса неочищенных сточных вод (млн куб. м) в модельных регионах



Рис. 8 Динамика ВРП (млн руб. в ценах 2010 года) в модельных регионах

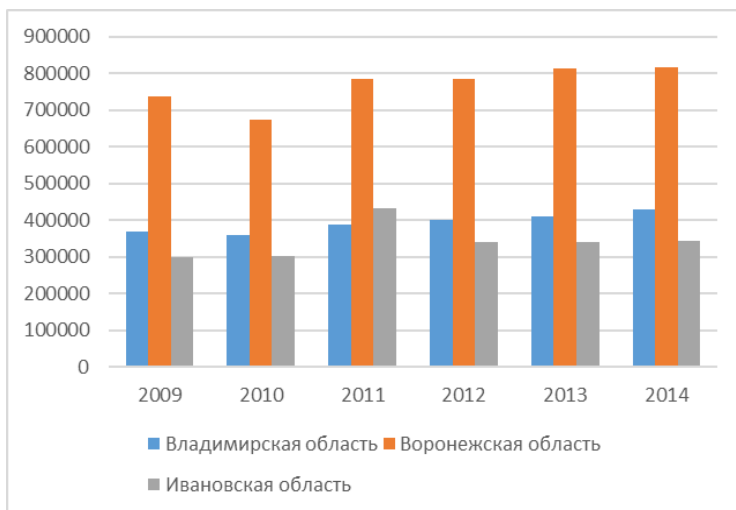


Рис. 9 Стоимость основных фондов (млн руб. в ценах 2010 года) в модельных регионах¹

Анализируя данные, представленные на рис. 4–8, можно сделать следующие выводы:

1. Активное наращивание объемов инвестиций в основной капитал, происходящее в Воронежской области в рассматриваемый период, привело к существенному увеличению валового регионального продукта, при этом существенного снижения негативного воздействия на окружающую среду не производилось, а по некоторым показателям (например, выбросы от автомобильного транспорта) оно увеличилось. Текущие затраты на охрану окружающей среды в течение наблюдаемого периода были подвержены колебаниям, но существенно не изменились, стоимость основных фондов выросла незначительно. Такой тип развития можно определить как экстенсивный, когда рост экономики происходит за счет увеличения потребления природных ресурсов и нагрузки на окружающую среду.

¹ Так как в статистических сборниках стоимость основных фондов указывается на конец года, то в качестве начального значения за рассматриваемый период взята стоимость на конец 2009 года, а в качестве последнего значения – стоимость на конец 2014 года.

2. Рост ВРП Владимирской области происходил без существенного увеличения инвестиций в основной капитал и сопровождался снижением негативного воздействия на окружающую среду и объемов текущих затрат на охрану окружающей среды. Стоимость основных фондов монотонно возрастала на протяжении всего наблюдаемого периода. Такой тип развития можно определить как интенсивный, когда рост экономики происходит за счет качественного улучшения экологических характеристик процессов производства и потребления.

3. Экономика Ивановской области осталась на уровне 2010 года по объему ВРП при снижении объемов инвестиции в основной капитал, снижении или заморозке негативного воздействия на окружающую среду, снижении текущих затрат на охрану окружающей среды. Стоимость основных фондов за исследуемый период испытала рост, но в целом осталась стабильной.

Сопоставляя данные наблюдения с различиями в результатах оценки эколого-экономической эффективности региональных систем в соответствии с подходом, предложенным в [3] и примененным для регионов ЦФО в [2] (модель А) и результатами оценки эффективности систем экологического менеджмента с учетом стоимостных входов (модель В), предложенной в настоящей работе, нетрудно заметить, что модель А лучше отражает количественные изменения, связанные с ростом экономики региона, тогда как модель В позволяет отследить качественные изменения, связанные со сменой типа развития экономики.

6. Заключение

Задачи регионального экологического менеджмента, характеризующиеся высокой сложностью, обусловленной наличием большого количества плохо наблюдаемых связей между ресурсами и результатами процессов производства и потребления, требуют разработки специальных методов и подходов, позволяющих выявить указанные латентные зависимости и представить их в форме, доступной для интерпретации и использования в процессе принятия решений. Большие возможности в этом плане представляет множество методов непараметрической

оптимизации под обобщенным названием экологический анализ среды функционирования.

На современном этапе развития методологии АСФ большинство методов разработаны для случая, когда все результаты деятельности изучаемых производственных объектов являются желательными и подлежат максимизации в процессе решения задачи, тогда как в экологическом анализе среды функционирования это базовое положение нарушается. Поэтому адаптация методов традиционного АСФ к ситуациям, когда некоторые выходы производственного объекта являются нежелательными, является актуальным трендом развития методологии анализа среды функционирования. Особый интерес в этом плане представляют малоизученные динамические задачи экологического АСФ.

Основным результатом настоящего исследования является обобщение динамической модели традиционного АСФ с учетом разделения входных переменных по типам запаса и потока на случай экологического анализа среды функционирования.

В качестве производственных объектов в модели рассматриваются региональные системы экологического менеджмента, на вход которых поступают ресурсы, измеренные в денежном выражении: текущие затраты на охрану окружающей среды (отражают прямое воздействие региональной системы экологического менеджмента на состояние окружающей среды) и инвестиции в основной капитал (отражают косвенное влияние модернизационных процессов в экономике на состояние окружающей среды). Учет переменной типа запаса – стоимости основных фондов – на начальном и конечном периодах рассматриваемого временного интервала позволяет проследить распределенный по времени эффект данного ресурса, а также включить в определение эффективности региона способность к накоплению данного вида ресурса.

Проведенные серии расчетов по построенной модели непараметрической оптимизации и сравнение их с результатами предыдущих исследований позволили сделать вывод о том, что предложенная модель позволяет отследить качественные изменения, связанные со сменой типа развития экономики, и отнести к эффективным только объекты с интенсивным типом развития,

когда рост экономики происходит за счет качественного улучшения экологических характеристик процессов производства и потребления.

Численная реализация предложенной модели может быть осуществлена с помощью прикладного программного обеспечения открытого доступа, что повышает вероятность ее успешного практического использования в процессах экологического менеджмента на региональном уровне.

Литература

1. КРИВОНОЖКО В.Е., ЛЫЧЕВ А.В. *Моделирование и анализ деятельности сложных систем*. – М.: ЛЕНАНД, 2013. – 256 с.
2. РАТНЕР С.В. *Динамические задачи оценки эколого-экономической эффективности регионов на основе базовых моделей анализа среды функционирования* // Управление большими системами. – 2017. – Вып. 67. – С. 81–106.
3. РАТНЕР С.В. *Задачи оптимизации траекторий развития региональных экономических систем по экологическим параметрам* // Друкерровский вестник. – 2016. – №2. – С. 30–41.
4. РАТНЕР С.В., АЛМАСТЯН Н.А. *Метод согласования экологических приоритетов энергетических компаний и региональных социо-экономических систем* // Инновации. – 2016. – №9. – С. 40–47.
5. РАТНЕР С.В., ИОСИФОВ В.В. *Оценка уровня развития процессных экологических инноваций* // Финансовая аналитика: проблемы и решения. – 2016. – №34. – С. 2–11.
6. ХРУСТАЛЕВ Е.Ю., РАТНЕР П.Д. *Анализ экологической эффективности электроэнергетических компаний России на основе методологии анализа среды функционирования* // Экономический анализ: теория и практика. – 2015. – №35. – С. 33–42.
7. ХРУСТАЛЕВ Е.Ю., РАТНЕР П.Д. *Эко-инновации в электроэнергетике: оценка сравнительной эффективности* // Инновации. – 2015. – № 9. – С. 8–14.
8. CHUNG Y.H., FARE R., GROSSKOPF S. *Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach* //

- Journal of Environmental Management. – 1997. – No. 51. – P. 229–240.
9. COOPER W.W., SEIFORD L.M., TONE T. *Introduction to Data Envelopment Analysis and Its Uses: With DEA-Solver Software and References*. – Springer, New York. 2006. – 388 p.
 10. EMROUZNEJAD A., THANASSOULIS E. *A mathematical model for dynamic efficiency using data envelopment analysis analysis* // Applied Mathematics and Computation. – 2005. – No. 160. – P. 363–378.
 11. FARE R., GROSSKOPF S., HERNANDEZ-SANCHO F. *Environmental performance: An index number approach* // Resource and Energy Economics. – 2004. – No. 26. – P. 343–352.
 12. KORHONEN P.J., LUPTACIK M. *Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis* // European Journal of Operational Research. – 2004. – No. 154. – P. 437–446.
 13. MALMQUIST S. *Index numbers and indifference surfaces* // Trabajos de Estadística. – 1953. – No. 4. – P. 209–242.
 14. SEIFORD L.M., ZHU J. *Modelling undesirable factors in efficiency evaluation* // European Journal of Operational Research. – 2002. – No. 142. – P. 16–20.
 15. TONE K., TSUTSUI M. *Dynamic DEA: A slacks-based measure approach* // Omega. – 2010. – Vol. 38, Iss. 3–4. – P.145–156.
 16. TYTECA D. *Linear programming models for the measurement of environmental performance of firms – concepts and empirical results* // Journal of Productivity Analysis. – 1997. – No. 8. – P. 183–197.
 17. TYTECA D. *On the measurement of the environmental performance of firms – a literature review and a productive efficiency perspective* // Journal of Environmental Management. – 1996. – No. 46. – P. 281–308.
 18. VALADKHANI A., ROSHDI I., SMYTH R. *A multiplicative environmental DEA approach to measure efficiency changes in the world's major polluters*. // Energy Economics. – 2016. – Vol. 54. – P. 363–375.

19. WU H., SHI Y., ZHU W. *Effectiveness of the policy of circular economy in China: A DEA-based analysis for the period of 11th five-year-plan* // Resources, Conservation and Recycling. – 2014. – No. 83. – P. 163–175.
20. ZHOU P., ANG B.W., POH K.L. *A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies* // European Journal of Operational Research. – 2008. – No. 189. – P. 1–18.
21. ZHOU P., ANG B. W., POH K. L. *Measuring environmental performance under different environmental DEA technologies* // Energy Economics. – 2008. – Vol. 30, Iss. 1. – P. 1–14.

DYNAMIC MODELS OF ENVIRONMENTAL DATA ENVELOPMENT ANALYSIS WITH STOCK AND FLOW VARIABLES

Svetlana Ratner, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, Leading researcher (lanarat@mail.ru).

Abstract: The paper devoted to the elaboration of methodological approach to the solution of dynamic problems of Environmental Data Envelopment Analysis for production facilities, whose activities are characterized by a set of variables of two different types - stock variables and flow variables. The limitations that are additionally imposed on the Production Possibility Set are studied. A task is set for assessing the comparative effectiveness of regional systems of environmental management that operate at a certain time interval. A computational example is given for assessing the comparative effectiveness of environmental management systems in the regions of the Central Federal District in the period from 2010 to 2014. The possibilities of using the developed method in practice are discussed.

Key words: data envelopment analysis, dynamic models, ecological effectiveness, regional economy, ecological management.

УДК 338.2

ББК 65.05.3

DOI: 10.25728/ubs.2018.76.3

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Р.М. Нижегородцевым.

Поступила в редакцию 24.07.2018.

Опубликована 30.11.2018.