

УДК 338.2
ББК 65.05.3

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИОНОВ НА ОСНОВЕ БАЗОВЫХ МОДЕЛЕЙ АНАЛИЗА СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ¹

Ратнер С.В.²,

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

Проведен сравнительный анализ применимости нескольких методов решения динамических задач анализа среды функционирования (АСФ) к вопросам мониторинга эколого-экономической эффективности хозяйственной деятельности региональных экономических систем (на примере регионов Центрального федерального округа). Рассматриваются метод формирования временных рядов на основе точечных оценок эколого-экономической эффективности, метод Малкмвиста и метод окна. Анализируются на устойчивость и адекватность результаты, полученные при различной ширине окна. Сравнение полученных результатов позволяет сделать вывод об однозначной предпочтительности метода окна для решения задач мониторинга эколого-экономической эффективности регионов не только с вычислительной, но и с содержательной точки зрения.

Ключевые слова: анализ среды функционирования, непараметрическая оптимизация, динамические задачи, метод окна.

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

² Светлана Валерьевна Ратнер, доктор экономических наук (lanarat@mail.ru, тел. (495) 334-79-00).

1. Введение

Анализ среды функционирования (в англоязычном варианте Data Envelopment Analysis, DEA) в настоящее время представляет собой развитую методологию сравнительной оценки эффективности функционирования различных производственных объектов по широкому набору входных и выходных показателей их деятельности. Эффективность в контексте анализа среды функционирования понимается как отношение взвешенной суммы выходов производственного объекта (полезных результатов деятельности, например, объема произведенной продукции) к взвешенной сумме его входов (потребляемых ресурсов), что позволяет классифицировать объекты как эффективные только в том случае, когда они производят наибольшие выходы при наименьших входах [14]. Базовые и модифицированные модели анализа среды функционирования успешно применяются для решения широкого класса практических задач управления: от формирования рейтингов предприятий [10], регионов [5], научно-инновационных программ [4] до выбора оптимальных путей повышения эффективности производственных объектов, деятельность которых на данный момент не является эффективной [6]. При этом в качестве производственных объектов могут рассматриваться как отдельные экономические агенты, так и их некоторые интеграционные образования (корпорации, кластеры, региональные экономические системы), главное, чтобы их деятельность могла быть описана одинаковым набором входных и выходных параметров.

Одним из основных факторов популярности DEA как исследовательского метода, безусловно, является наличие доступного программного обеспечения, позволяющего свести сложность решения реальных практических задач к минимуму. Так, в открытом доступе на сегодняшний день представлены пакеты DEA Frontier, MaxDEA, Open Source DEA и др., которые позволяют использовать радиальные модели с постоянной и переменной отдачей на масштаб, ориентированные по входу и выходу. В то же время некоторые более сложные модификации базовых моделей DEA, в частности, позволяющие исследовать эффективность функционирования производственных объектов в

динамике, в вышеперечисленных пакетах реализованы уже в виде дополнительных опций, предоставляемых на платной основе.

Наиболее распространенным в литературе методом оценки эффективности функционирования производственных объектов в динамике является метод, основанный на расчете индекса Малкмвиста [21]. В отличие от простого сравнения коэффициентов эффективности каждого из исследуемых производственных объектов в момент времени t и в момент времени $t + 1$, рассчитанных в результате решения двух независимых задач DEA, при расчете индекса Малкмвиста учитывается также изменение самой границы эффективности множества производственных объектов, которое может иметь место в период между моментами t и $t + 1$. При этом сложность решения задачи и необходимый объем вычислений существенно увеличиваются.

Преодолеть данные трудности и свести задачу мониторинга эффективности производственных n объектов в динамике к последовательному решению двух или более базовых моделей DEA можно, используя прием, называемый в некоторых источниках «window analysis» [15], суть которого близка к методу скользящего среднего. Идея метода состоит в выборе окна наблюдения для каждого производственного объекта определенной ширины w (например, логично взять $w = 4$, если данные для каждого производственного объекта представлены поквартально). Тогда каждый набор входных и выходных данных в момент времени от 1 до w представляет отдельный «производственный объект», т.е. задача оценки сравнительной эффективности решается для $w \times n$ «производственных объектов», а для каждого реального производственного объекта в результате рассчитывается w коэффициентов эффективности. Далее окно сдвигается на одно наблюдение вправо и вновь рассчитывается w коэффициентов эффективности для каждого производственного объекта. В итоге в качестве динамической меры эффективности производственного объекта может быть взято среднее арифметическое коэффициентов эффективности, рассчитанных для данного момента времени при разных границах окна. Такой подход позволяет обеспечить робастность оценок эффективности и в тоже время выявить тренды в изменении эффективности

производственных объектов, оставаясь при этом в зоне работоспособности базовых моделей DEA, обеспеченных программными продуктами открытого доступа.

Апробация данного метода была проведена на примере решения задачи оценки сравнительной комплексной эколого-экономической эффективности региональных экономических систем (РЭС). Статический случай был рассмотрен в работе [8], где в качестве эффективных (в контексте концепции устойчивого развития) признаны регионы, производящие максимальные полезные экономические и социальные эффекты (выраженные как ВРП и количество населения) при минимальных объемах негативного воздействия на окружающую среду (выбросах в атмосферу, водные объекты и загрязнение почв). Динамический случай (в той же содержательной постановке) рассмотрен в данной работе.

Задача мониторинга эффективности РЭС в динамике решалась тремя способами: 1) простым расчетом коэффициентов эффективности для каждой РЭС в течение исследуемого периода (2010–2014 гг.); 2) расчетом значений индекса Малкмуиста для каждой РЭС в периоды 2010–2011 гг., 2011–2012 гг. и т.д.; 3) расчетом коэффициентов эффективности для каждой РЭС по методу окна. Сравнение полученных результатов позволяет сделать вывод об однозначной предпочтительности метода окна для решения такого рода задач не только с вычислительной, но и с содержательной точки зрения.

2. Постановка динамической задачи сравнительной оценки эколого-экономической эффективности региональных экономических систем

Рассмотрим задачу об оценке эффективности функционирования региональных экономических систем (РЭС) по набору эколого-экономических показателей за период времени T . Для этого в каждый момент времени t периода T используем базовую ориентированную по входам модель экологического анализа среды функционирования (ЭАСФ) [19], которая отличается от традиционной модели анализа среды функционирования (АСФ) наличием нежелательных выходов. Для всех моментов времени

$t \in (1, \dots, T)$ представим каждую РЭС $_t$ как объект, на вход которого подаются ресурсы (энергия, сырье, труд, капитал и т.д.), а на выходе получается экономический результат, который может быть измерен любых широко используемых на практике показателях, таких как валовый региональный продукт, валовая добавленная стоимость, уровень дохода населения и т.д. Кроме того, на выходе каждого объекта образуются негативные экологические эффекты как неизбежный результат хозяйственной деятельности человека – выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, забор природных вод для нужд экономики, твердые отходы, сбросы недостаточно очищенных сточных вод. Для каждого производственного объекта (РЭС $_i$) ищется возможность сокращения входов (объемов затрачиваемых ресурсов) и нежелательных выходов (негативных экологических эффектов) без сокращения желательных выходов (экономического результата). Объекты, которые при минимальном количестве затрачиваемых ресурсов и объеме негативных экологических эффектов производят максимальный экономический результат, возможный в данный момент времени t , признаются эффективными.

Формализация данной задачи возможна следующим образом. Имеется K однородных производственных объектов (ПО), каждый из которых задан N входами и M выходами. Выходы $1, 2, \dots, p$ являются желательными (полезными), а $p + 1, p + 2, \dots, M$ – нежелательными (негативные экологические эффекты).

В коэффициентной форме задача оценки эффективности ПО с индексом 0 в период времени t записывается следующим образом:

$$(1) \quad \max_{u,v} \sum_{m=1}^M u_m y_{m0}^t$$

при ограничениях

$$\sum_{m=1}^M u_m y_{mk}^t - \sum_{n=1}^N v_n x_{nk}^t \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, K;$$

$$\sum_{n=1}^N v_n x_{n0}^t = 1;$$

$$u_m, v_n \geq 0 \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad n = 1, 2, \dots, N;$$

где $X^t = (x_{10}^t, \dots, x_{N0}^t) \geq 0$ – вектор входов размерности N в момент времени t ; $Y^t = (y_{10}^t, \dots, y_{M0}^t) \geq 0$ – вектор выходов размерности M в момент времени t ; K – количество производственных объектов; u_m, v_n – неизвестные неотрицательные веса, подлежащие определению.

Задача также может быть сформулирована в двойственной форме:

$$(2) \min_{\lambda} \theta$$

при ограничениях

$$\sum_{n=1}^N x_{nk}^t \lambda_k \leq \theta x_{n0}^t, \quad n = 1, 2, \dots, N;$$

$$\sum_{m=1}^M y_{mk}^t \lambda_k \geq y_{m0}^t, \quad m = 1, 2, \dots, M;$$

$$\lambda_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, K.$$

Для каждого производственного объекта решается дробно-линейная задача математического программирования, в которой максимизируется отношение следующего вида:

$$(3) \quad h = \frac{\sum_{r=1}^p \mu_r y_{r0}^t - \sum_{s=p+1}^N \mu_s y_{s0}^t}{\sum_{i=1}^M v_i x_{i0}^t}$$

при ограничениях

$$(4) \quad \frac{\sum_{r=1}^p \mu_r y_{rj}^t - \sum_{s=p+1}^N \mu_s y_{sj}^t}{\sum_{i=1}^M v_i x_{ij}^t} \leq 1.$$

Отношение (3) при этом называется коэффициентом (или мерой) моментной эколого-экономической эффективности ПО. Объекты, для которых коэффициент моментной эффективности равен единице, признаются эффективными, а остальные – неэффективными в момент времени t . После того как для каждого момента времени $t \in (t_1, \dots, T)$ будут рассчитаны значения коэффициентов эффективности всех РЭС, полученные динамические ряды коэффициентов эффективности исследуются на наличие трендов.

Нежелательные выходы можно также рассматривать наравне с входами модели, тогда моментная мера эффективности примет следующий вид:

$$h^* = \frac{\sum_{r=1}^k \mu_r y_{r0}^t}{\sum_{i=1}^M v_i x_{i0}^t + \sum_{s=k+1}^p \mu_s y_{s0}^t}.$$

В работе [20] было доказано, что меры эколого-экономической эффективности h и h^* являются эквивалентными и могут одинаково успешно использоваться для решения базовых моделей ССР, а в работах [8, 10–11, 19] показано, что в простейшем случае нежелательные выходы (негативные экологические эффекты) могут рассматриваться как единственные входы модели. Такая интерпретация нежелательных выходов вполне оправдана в том случае, когда при решении задачи нет необходимости отслеживать эффективность использования каждого отдельного вида ресурсов (например, энергоэффективность), подаваемых на вход РЭС [8–9]. В данной упрощенной постановке задачи эффективными признаются те ПО, которые производят максимальный социо-экономический результат с минимальными негативными экологическими эффектами. Их множество задает границу эффективности, которая в случае модели ССР представляет собой гиперповерхность выпуклого многогранного конуса. Объекты, значения коэффициентов эффективности которых оказались меньше единицы, посредством пропорционального сокращения входов могут приблизиться к границе эффективности: $(X_0^t, Y_0^t) \Rightarrow (hX_0^t, Y_0^t)$ [3].

Эффективная точка получается из исходной с помощью дополнительных переменных $S^+(s_1^+, \dots, s_N^+)$ и $S^-(s_1^-, \dots, s_M^-)$ посредством сдвига по ним $(hX_0^t - S^-, Y_0^t + S^+)$. Дополнительные переменные определяются на второй фазе решения оптимизационной задачи и трактуются как потенциал снижения негативных экологических эффектов. В некоторых литературных источниках расчет дополнительных переменных также называется методом задания цели [12], так как определенным таким образом потенциал снижения каждого из негативных экологических эффектов является целевым параметром для производ-

ственного объекта в процессе достижения эффективности. Исследование динамических рядов по каждому из целевых параметров также дает множество дополнительной информации для лиц, принимающих решения (ЛПР) в сфере экологического менеджмента региональных экономических систем.

3. Методы решения динамических задач оценки эффективности производственных объектов

Для оценки изменения эффективности ПО во времени в задачах АСФ в настоящее время наиболее часто используется индекс производительности Малмквиста (Malmquist productivity index, MPI), который является непараметрическим методом анализа временных рядов [21].

Обозначим через $h^t(X_0^t, Y_0^t)$ и $h^{t+1}(X_0^{t+1}, Y_0^{t+1})$ меры эффективности ПО₀ в моменты времени t и $t + 1$, рассчитанные посредством решения задачи (1) для моментов времени t и $t + 1$ соответственно. Кроме того, определим $h^t(X_0^{t+1}, Y_0^{t+1})$ – меру эффективности ПО₀ в момент времени t относительно границы эффективности будущего периода $t + 1$ посредством решения следующей задачи:

$$(5) \min_{\lambda} \theta$$

при ограничениях

$$\sum_{n=1}^N x_{nk}^t \lambda_k \leq \theta x_{n0}^{t+1}, \quad n = 1, 2, \dots, N;$$

$$\sum_{m=1}^M y_{mk}^t \lambda_k \geq y_{m0}^{t+1}, \quad m = 1, 2, \dots, M;$$

$$\lambda_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, K.$$

Аналогично определим $h^{t+1}(X_0^t, Y_0^t)$ – меру эффективности ПО₀ в момент времени $t + 1$ относительно границы эффективности прошлого периода t .

Тогда индекс производительности Малмквиста может быть представлен как

$$(6) \quad MPI_0 = \left[\frac{h^t(X_0^{t+1}, Y_0^{t+1})}{h^t(X_0^t, Y_0^t)} \cdot \frac{h^{t+1}(X_0^{t+1}, Y_0^{t+1})}{h^{t+1}(X_0^t, Y_0^t)} \right]^{1/2}.$$

Значения $MPI_0 < 1$, $MPI_0 = 1$ и $MPI_0 > 1$ говорят соответственно о снижении, постоянстве или увеличении эффективности $ПО_0$ в течение исследуемого периода [18]. Кроме того, в литературе часто используют форму представления индекса Малмквиста, в которой изменение производительности (эффективности) представлено в декомпозированном виде, где первая часть представляет собой эффекта сдвига границы эффективности (Frontier Shift Effect), а вторая – эффект роста относительной эффективности (Catch-up Effect).

По сравнению с точечным методом решения динамической задачи, когда расчет мер эффективности ПО осуществляется по каждой точке из интервала наблюдений, а потом полученные точечные значения формируют временной ряд, определение динамики эффективности через расчет индекса Малмквиста позволяет учесть сдвиг границы эффективности. Учитывая то, что АСФ позволяет оценить эффективность ПО только в сравнении с другими ПО, это является важным моментом. В контексте решения задач оценки эколого-экономической эффективности РЭС результат $h^t(X_0^t, Y_0^t) > h^{t+1}(X_0^{t+1}, Y_0^{t+1})$ еще не означает, что с течением времени у РЭС₀ произошло увеличение негативных экологических эффектов или снижение социально-экономических показателей хозяйственной деятельности. Такой результат также может свидетельствовать о том, что у других РЭС (всех или по крайней мере некоторых из них) в момент $t + 1$ по сравнению с моментом t произошло снижение негативных экологических эффектов или улучшение экономических показателей, тогда как показатели РЭС₀ остались на уровне предыдущего временного периода. Расчет индекса Малмквиста позволяет устранить данную неопределенность результата решения точечных задач.

Однако данный метод решения динамических задач оценки эффективности ПО тоже не свободен от недостатков. В качестве основного в контексте решения задач оценки эколого-экономической эффективности регионов можно выделить необ-

ходимость проведения попарного сравнения моментов наблюдений на всем промежутке $t \in (t_1, \dots, T)$. Кроме того, если сформированный точечным методом временной ряд эффективности ПО далее может быть исследован с помощью обычных регрессионных моделей и моделей с распределенными лагами [7], то ряд, состоящий только из значений индекса Малкмвиста, позволяет провести анализ динамики эффективности ПО только на качественном уровне.

Вторым по распространенности методом решения динамических задач АСФ является метод окна, который позволяет сравнить исследуемый объект по эффективности производственной деятельности не только с другими аналогичными объектами, но и с самим собой в другие периоды времени. Для этого каждый из K рассматриваемых ПО_{*i*} представляется в виде набора T однородных объектов ПО_{*i*}^{*t*}, ПО_{*i*}^{*t*}₂, ..., ПО_{*i*}^{*T*}, задаваемых входами $X_i^{t_1}, X_i^{t_2}, \dots, X_i^T$ и выходами $Y_i^{t_1}, Y_i^{t_2}, \dots, Y_i^T$. Базовая задача АСФ вида (1) решается $T - w + 1$ раз для $K \times w$ ($w \leq T$) производственных объектов (или, в контексте данного исследования, регионов) ПО₁^{*t*}_{*j*}, ПО₁^{*t*}_{*j*}+1, ..., ПО₁^{*t*}_{*j*}+ w , ..., ПО_{*K*}^{*t*}_{*j*}, ПО_{*K*}^{*t*}_{*j*}+1, ..., ПО_{*K*}^{*t*}_{*j*}+ w .

Первый раз решение задачи вида (1) осуществляется для временного интервала $t_1, \dots, t_1 + w$. Обозначим его как w_1 . В результате решения задачи \forall ПО_{*i*} вычисляется w коэффициентов моментной эффективности $h^{t_1}(X_i^{t_1}, Y_i^{t_1}), h^{t_1+1}(X_i^{t_1+1}, Y_i^{t_1+1}), \dots, h^{t_1+w}(X_i^{t_1+w}, Y_i^{t_1+w})$, соответствующие ПО_{*i*}^{*t*}₁, ПО_{*i*}^{*t*}₂, ..., ПО_{*i*}^{*t*}_{1+w}.

Далее окно сдвигается на один временной интервал вправо. В результате второго решения задачи по окну $w_2: t_2, \dots, t_2 + w$ вычисляются коэффициенты моментной эффективности $h^{t_2}(X_i^{t_2}, Y_i^{t_2}), h^{t_2+1}(X_i^{t_2+1}, Y_i^{t_2+1}), \dots, h^{t_2+w}(X_i^{t_2+w}, Y_i^{t_2+w})$.

Процесс перемещения окна по периоду наблюдения продолжается до момента $t = T - w + 1$, в результате чего для каждого ПО_{*i*}^{*t*}, за исключением ПО_{*i*}^{*t*}₁ и ПО_{*i*}^{*T*}, рассчитывается несколько коэффициентов моментной эффективности по разным окнам.

Так, $ПО_i^{t_2}$ соответствуют два коэффициента моментной эффективности $h_{w_1}^{t_2}$ и $h_{w_2}^{t_2}$, $ПО_i^{t_3}$ – три коэффициента моментной эффективности $h_{w_1}^{t_3}$, $h_{w_2}^{t_3}$ и $h_{w_3}^{t_3}$ и т.д. В качестве итогового значения коэффициента моментной эффективности принимается среднее арифметическое коэффициентов, полученных по разным окнам:

$$h_{avr}^t = 1/q \sum_{j=1}^q h_{w_j}^t,$$

где q – количество окон, по которым получены коэффициенты моментной эффективности.

В задачах оценки сравнительной энергетической и экологической эффективности производственных объектов зачастую предполагается, что все объекты используют примерно одни и те же технологии производства [23]. Тогда различия в эффективности исследуемых объектов объясняются полностью качеством менеджмента. Данное предположение накладывает некоторые ограничения на применимость метода окна. Так как с течением времени производственные технологии могут меняться, ширину окна нужно полагать достаточно малой, чтобы не допустить сравнения эффективности объектов, работающих на старой технологии, с объектами, работающими на новой, более эффективной технологии. В большинстве исследований, придерживающихся предположения о неизменности технологической базы производственных процессов, ширина окна полагается равной трем годам [23–24]. Однако в контексте решения задачи оценки сравнительной эколого-экономической эффективности региональных экономических систем данное ограничение является несущественным. Нас будет интересовать любое изменение эколого-экономической эффективности региона, вне зависимости, чем оно вызвано: повышением качества менеджмента ресурсов, внедрением новых производственных технологий более высокого класса экологичности, проведением природоохранных мероприятий, или изменением структуры экономики региона с акцентом на развитие высокотехнологичных отраслей [1].

Еще одним ограничением метода окна, часто обсуждаемым в литературе, является устойчивость получаемых оценок коэффициента эффективности. В ряде работ (например, [22]) устойчивость предлагается оценивать по стандартному отклонению

$$(7) \quad STD_i = \sqrt{\frac{\sum_{t=t_1}^T \sum_{k=1}^{T-w+1} (h_{i,w_k}^t - h_{avr}^t)^2}{w \times (T - w + 1)}}$$

или вариации

$$(8) \quad Var_i = \max(h_{i,w}^t) - \min(h_{i,w}^t).$$

В работах других авторов (например, [24]) оценку устойчивости предлагается проводить по размаху значений коэффициентов эффективности, полученных по разным окнам, для каждого момента времени из интервала $t \in (t_1, \dots, T)$:

$$(9) \quad CR_i^t = \max(h_{i,w}^t) - \min(h_{i,w}^t).$$

Вне зависимости от того, используется ли для расчетов формула (7), (8) или (9), оценка устойчивости для начального t_1 и конечного T моментов периода наблюдения проводится только по одному значению. Поэтому в большинстве исследований авторы просто опускают данный момент из рассмотрения, оценивая устойчивость ПО только внутри интервала наблюдения [23–24]. Преодолеть данное ограничение и включить в рассмотрение крайние точки t_1 и T можно посредством «кругового» метода (round robin method), предложенного в работе [22], суть которого заключается в том, что эффективность каждого ПО рассматривается сначала только в момент t_1 , потом в период (t_1, t_2) , далее в период (t_1, t_2, t_3) и так до периода (t_1, \dots, T) . Такой подход позволяет получить более полную картину динамики каждого ПО, включая вопросы устойчивости и наличия трендов, однако вычислительная сложность задачи при этом значительно увеличивается.

Рассмотрим преимущества и недостатки описанных методов решения динамических задач оценки эколого-экономической эффективности региональных экономических систем на конкретном примере оценки устойчивости траекторий

развития регионов Центрального федерального округа в период 2010–2014 гг.

4. Сравнительный анализ результатов решения динамической задачи оценки эколого-экономической эффективности региональных экономических систем разными методами

Пусть каждая региональная экономическая система описывается следующим набором входных и выходных параметров:

x_{1i}^t – годовой объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников (тыс. т);

x_{2i}^t – годовой объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от автомобильного транспорта (тыс. т);

x_{3i}^t – годовой объем сброса неочищенных сточных вод (млн м³);

x_{4i}^t – годовой объем сброса недостаточно очищенных сточных вод (млн м³);

x_{5i}^t – годовой объем образования промышленных и бытовых отходов (млн т);

x_{6i}^t – годовой объем забора свежей воды из природных поверхностных и подземных объектов (млн м³);

y_{1i}^t – годовой объем валового регионального продукта, приведенный (дефлированный) к ценам 2010 года (млн руб.);

u_{2i}^t – количество населения в регионе (тыс. чел).

Выбор вышеперечисленных показателей объясняется, с одной стороны, принципом разумной достаточности, с другой стороны – доступностью. Использование представительного набора входов и выходов при моделировании эколого-экономической эффективности РЭС позволяет учесть больше аспектов. Однако в том случае, когда количество входов и выходов близко или превышает количество рассматриваемых ПО, возникает проблема недостаточной дискриминирующей способности АСФ [9, 14, 23–24], которая характеризуется тем, что в

результате решения задачи значительная доля всех ПО признаются эффективными. Поэтому количество входов и выходов модели АСФ не должно быть слишком большим, а выбранные входные и выходные показатели должны быть наиболее информативными.

Российская система статистического учета экологических аспектов хозяйственной деятельности в настоящее время активно совершенствуется. В ежегодных государственных докладах «О состоянии и об охране окружающей среды в Российской Федерации», публикуемых в открытом доступе на официальном сайте Министерства природных ресурсов РФ (www.mnr.gov.ru), показатели антропогенной нагрузки периодически детализируются, добавляются, методики их расчета уточняются. Так, например, в 2010 г. в ежегодных государственных докладах произведена дифференциация показателя объема сброса сточных вод в природные объекты, введен показатель потребления свежей воды в регионе, учитываются способы обращения с отходами (переработка, захоронение), введены показатели климатических изменений и т.д. Это позволяет учитывать больше экологических аспектов при оценке эколого-экономической эффективности РЭС, однако ограничивает период наблюдения отрезками, на которых система статистического учета не претерпевала существенных изменений.

Предложенный набор входных и выходных показателей выполнен на основе учета результатов работ [1–2, 8, 12, 23–24]. Расчет коэффициентов эффективности для каждого региона ЦФО (за исключением г. Москвы как субъекта, представляющего полностью городскую территорию) проводился несколькими разными методами: 1) точечным; 2) по методу окна при ширине окна, равной всему периоду наблюдения; 3) по методу окна при ширине окна три года; 4) по методу окна при ширине окна два года. Результаты расчетов¹ коэффициентов эколого-экономической эффективности регионов ЦФО за период

¹ Все расчеты проводились с использованием пакета прикладных программ открытого доступа MaxDEA на статистических данных, взятых из государственных докладов «О состоянии и об охране окружающей среды в Российской Федерации» за период 2010–2014 гг.

2010–2014 гг., полученные точечным методом, приведены в таблице 1, результаты расчета по методу окна при ширине окна, равной 3 года, приведены в таблице 2.

Таблица 1. Значения коэффициентов эколого-экономической эффективности регионов ЦФО, рассчитанные точечным методом

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

Анализируя результаты расчетов, приведенные в таблицах 1 и 2, можно сделать вывод о том, что эколого-экономическая эффективность большинства регионов ЦФО достаточно высокая. Наиболее высокие показатели эколого-экономической эффективности имеют Белгородская, Калужская, Московская, Тамбовская области, наименее высокие – Ивановская, Рязанская и Тульская области.

Метод окна, как и ожидалось, обладает более высокой дискриминирующей способностью за счет того, что каждый раз задача АСФ решается для 3×17 производственных объектов, а не для 17, как в точечном методе, при том же количестве входов и выходов ПО. При использовании метода окна только два объекта – Калужская и Тамбовская области – остаются эффективными на протяжении всего периода наблюдения.

Таблица 2. Значения коэффициентов эколого-экономической эффективности регионов ЦФО, рассчитанные по окну шириной три года

Регион	2010	2011	2012	2013	2014
Белгородская обл.	1	0,9500	1	1	1
Брянская область	1	1	0,9847	1	1
Владимирская обл.	0,9414	0,9188	0,9936	1	1
Воронежская обл.	1	0,9973	0,9588	0,9667	1
Ивановская область	0,7868	0,7330	0,8102	0,7929	0,7466
Калужская область	1	1	1	1	1
Костромская обл.	0,9312	0,8334	0,8339	0,8121	0,7941
Курская область	1	1	0,9419	0,9891	1
Липецкая область	0,9490	0,9997	0,9958	0,9862	1
Московская обл.	0,9675	1	1	1	1
Орловская область	0,9210	0,8925	1	0,9278	0,9396
Рязанская область	0,6581	0,6602	0,6930	0,7155	0,6928
Смоленская обл.	0,8056	0,7892	0,7722	0,8041	0,9205
Тамбовская область	1	1	1	1	1
Тверская область	1	1	0,9273	0,9820	1
Тульская область	0,7681	0,7104	0,7272	0,6561	0,6213
Ярославская обл.	0,8068	0,8517	0,8831	0,9690	1

Для получения более детальных выводов проведем сравнительный анализ результатов расчетов эколого-экономической эффективности отдельных регионов, полученных при различной ширине окна – пять лет, три года, два года, а также результатов, полученных точечным методом (рис. 1–2). Нетрудно заметить, что при использовании окна максимальной ширины (весь период наблюдения), значения коэффициента эффективности у неэффективных объектов минимальные. Поэтому неэффективные объекты становится гораздо проще дифференцировать между собой.

Чем уже ширина окна, тем значение коэффициента эффективности получается выше. С другой стороны, направление изменения динамики эффективности ПО (уменьшение или рост) может меняться на противоположное. Так, например, если анализировать динамику эколого-экономической эффективно-

сти Рязанской области по точкам, то можно заметить ее снижение. Это значит, что относительно других регионов эколого-экономическая эффективность Рязанской области становится с каждым годом все хуже. Если же анализировать динамику по окну, ширина которого равна всему периоду наблюдения, то можно заметить, что эколого-экономическая эффективность Рязанской области повышается. То есть, сравнивая экологичность хозяйственной (производственной и бытовой) системы региона в разные периоды времени, мы можем заметить улучшения. Общий вывод относительно изменения эколого-экономической эффективности региона в данном случае таков: экологическая эффективность хозяйственной системы региона повышается, однако не так быстро, как в других регионах.

Заметим, что анализ изменений эколого-экономической эффективности региона по методу окна с шириной, равной трем или двум годам, в данном случае не позволяет выделить какого-либо явного тренда.

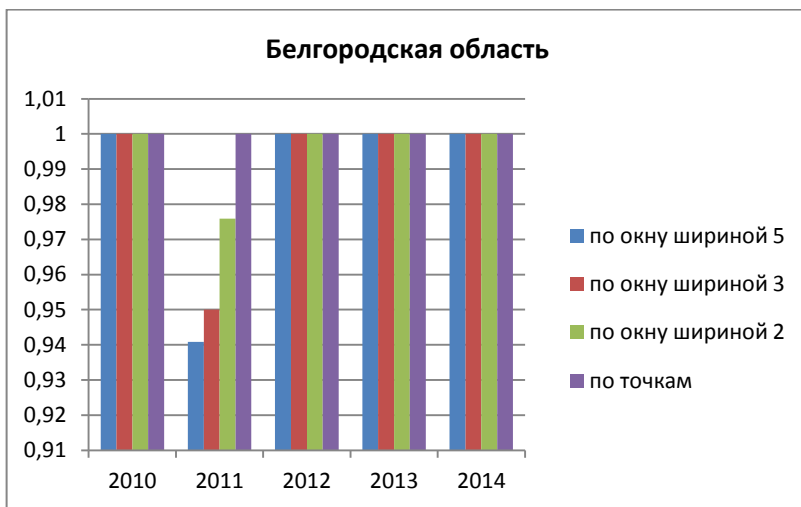


Рис. 1. Сравнение результатов расчетов эколого-экономической эффективности Белгородской области в динамике по разным методам и с разной шириной окна

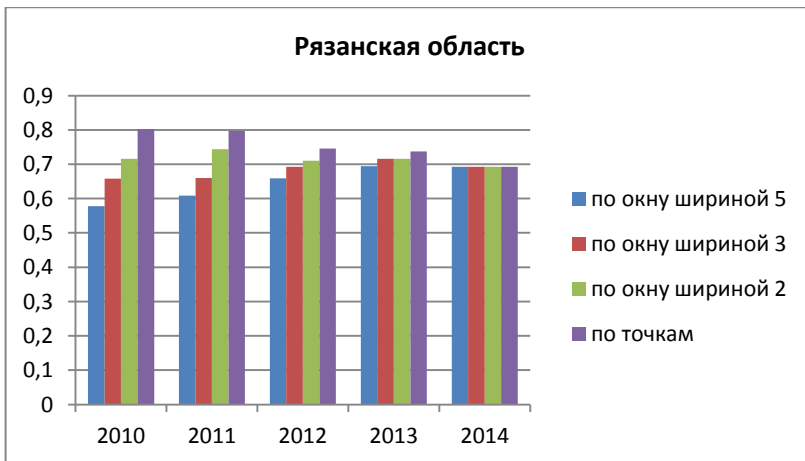


Рис. 2. Сравнение результатов расчетов эколого-экономической эффективности Рязанской области в динамике по разным методам и с разной шириной окна

Сравнивая устойчивость оценок эколого-экономической эффективности, полученных при различной ширине окна по формуле (7), можно отметить, что стандартное отклонение для большинства регионов меняется незначительно (таблица 3).

Наиболее устойчивые показатели эколого-экономической эффективности в течение наблюдаемого периода при различной ширине окна демонстрируют Калужская, Тамбовская, Брянская, Липецкая и Московская области, наименее устойчивые – Костромская, Смоленская, Ярославская области. Заметные изменения устойчивости оценок в зависимости от ширины окна наблюдаются только по Курской и Тульской области, однако даже в этом случае их нельзя признать существенными, так как разница составляет не более 7% от минимального значения коэффициента эффективности. Однако даже столь несущественные различия становятся гораздо более значимыми и заметными при анализе потенциала улучшений эколого-экономической эффективности регионов по методу задания цели.

Таблица 3. Стандартное отклонение оценок эколого-экономической эффективности регионов ЦФО при разной ширине окна

Регион	<i>STD, w=5</i>	<i>STD, w=3</i>	<i>STD, w=2</i>
Белгородская обл.	0,0264	0,0221	0,0171
Брянская область	0,0160	0,0120	0,0036
Владимирская обл.	0,0488	0,0367	0,0241
Воронежская обл.	0,0444	0,0376	0,0236
Ивановская область	0,0376	0,0349	0,0285
Калужская область	0,0000	0,0000	0,0000
Костромская обл.	0,0433	0,0517	0,0681
Курская область	0,0715	0,0444	0,0153
Липецкая область	0,0257	0,0180	0,0104
Московская обл.	0,0280	0,0108	0,0082
Орловская область	0,0570	0,0459	0,0400
Рязанская область	0,0518	0,0364	0,0395
Смоленская обл.	0,0761	0,0500	0,0625
Тамбовская область	0,0000	0,0000	0,0000
Тверская область	0,0429	0,0354	0,0189
Тульская область	0,0264	0,0560	0,0746
Ярославская обл.	0,1172	0,0718	0,0520

5. Анализ потенциала роста уровня экологичности хозяйственной деятельности регионов

Для определения потенциала роста эколого-экономической эффективности тех регионов, чья хозяйственная деятельность в результате решения статической задачи АСФ признана неэффективной, в литературе традиционно применяется метод задания цели [12, 17], суть которого состоит в расчете проекций неэффективных ПО в пространстве входов/выходов на границу эффективности, что позволяет определить целевые ориентиры по сокращению входов/увеличению выходов, достижение которых позволяет стать ПО эффективным. Метод задания цели успешно используется в статических задачах определения потенциала повышения энергоэффективности [12], ресурсосбере-

жения [10, 23], а также при поиске оптимальных направлений согласования приоритетов экологической политики компаний «грязных» отраслей экономики с приоритетами устойчивого развития регионов [6]. Аналогичный подход может быть применен в случае динамической задачи АСФ. Однако содержательная экономическая интерпретация полученных результатов в данном случае должна проводиться с осторожностью.

Рассмотрим целевые параметры выбросов от стационарных источников и автомобильного транспорта для Рязанской области (неэффективный регион на протяжении всего периода наблюдения), рассчитанные точечным методом и по методу окна при разной ширине окна (таблицы 4–5).

Таблица 4. Целевые показатели выбросов от стационарных источников для Рязанской области

Рязанская обл.	2010	2011	2012	2013	2014
$w = 5$	38,16	48,51	48,62	44,71	45,26
$w = 3$	45,06	50,80	56,28		
		48,31	51,49	50,49	
			48,62	44,71	45,26
среднее	45,06	49,55	52,13	47,60	45,26
$w = 2$	38,04	45,64			
		50,80	56,28		
			51,49	50,49	
				44,71	45,26
среднее	38,04	48,22	53,89	47,60	45,26
$w = 1$	59,80	45,64	56,80	50,46	45,26

Таблица 5. Целевые показатели выбросов от автомобильного транспорта для Рязанской области

Рязанская обл.	2010	2011	2012	2013	2014
$w = 5$	76,96	84,72	90,60	90,20	90,73
$w = 3$	87,66	96,02	102,12		
		87,78	93,15	92,45	
			90,60	90,20	90,73
среднее	87,66	91,90	95,29	91,33	90,73
$w = 2$	95,38	106,03			
		96,02	102,12		
			93,15	92,45	
				90,20	90,73
среднее	95,38	101,03	97,63	91,33	90,73
$w = 1$	106,85	106,03	102,57	92,54	90,73

Выделить какие-либо устойчивые тренды в динамике оценок потенциала снижения негативных экологических эффектов не удается. Это объясняется не только отсутствием системности в экологической политике регионов¹, но и изменением значимости (весовых коэффициентов) вклада отдельных негативных экологических эффектов в общую экологическую ситуацию в регионе. Расчет уникальных для каждого ПО весовых коэффициентов, входящих в линейные свертки входов и выходов, является характерной особенностью базовых моделей АСФ и отличает их от многочисленных методов ранжирования [13]. Поэтому выбор ориентира для элиминирования негативных экологических эффектов может проводиться на основе учета предпочтений ЛПР.

С точки зрения развития систем регионального экологического менеджмента целесообразно выбрать такие ориентиры по

¹ Если бы целевые показатели монотонно снижались, это можно было бы интерпретировать как результат действия системы регионального экологического менеджмента, направленной на постоянное элиминирование негативных экологических эффектов за счет проведения природоохранных мероприятий или развития эко-инноваций.

элиминированию негативных экологических эффектов РЭС, которые соответствуют их минимальным возможным показателям, достижимым без сокращения суммарных полезных выходов производственной деятельности экономических агентов и социальной подсистемы РЭС. Такими показателями являются целевые параметры, рассчитанные по окну с шириной, равной всему периоду наблюдения. Так как при решении задачи АСФ по окну максимальной ширины РЭС сравниваются по эффективности, как друг с другом, так и с собой в разные временные моменты периода наблюдения, минимальные возможные показатели негативных экологических эффектов могут быть достигнуты только за счет *комплексного* повышения экологичности хозяйственной деятельности региона, включая повышение эффективности менеджмента ресурсов, переход на наилучшие доступные технологии производства, полный или частичный отказ от «грязных» видов производств и паттернов потребительского поведения.

6. Заключение

Основным результатом данной работы является адаптация метода окна под решение задач мониторинга комплексной эколого-экономической эффективности функционирования региональных производственных систем в динамике. В отличие от простого решения не связанных друг с другом задач оценки сравнительной эффективности РЭС в каждой отдельной точке исследуемого периода, метод окна позволяет выявить динамику эффективности, связанную со сдвигом границ эффективности всего множества рассматриваемых объектов, обусловленную, как правило, внедрением технологических эко-инноваций (наилучших доступных технологий производства) или изменением структуры экономики региона. В отличие от результатов, полученных с помощью расчета индекса Малмквиста, эта динамика в результатах, полученных по методу окна, прослеживается более наглядно и позволяет сделать содержательные выводы относительно целей и направлений развития и совершенствования систем регионального экологического менеджмента.

Оценки эколого-экономической эффективности РЭС по окну максимальной ширины, равной всему периоду наблюдения, позволяют наилучшим образом дискриминировать РЭС, а также рассчитать целевые ориентиры для снижения негативных экологических эффектов, которые могут быть положены в основу комплексных программ совершенствования экологического менеджмента в регионах.

Простота технической реализации предложенного метода и доступность необходимого для его использования программного обеспечения позволяют надеяться на его широкое распространение в практике регионального экологического менеджмента.

Литература

1. ВОРОНИНА Л.А., ИОСИФОВ В.В., ДИРА Д.В., НЕСТЕРЕНКО Е.А. *Мировой опыт налогового стимулирования инвестиций в развитие высокотехнологичных видов экономической деятельности* // Финансы и кредит. – 2012. – №13(493). – С. 63–70.
2. ИОСИФОВ В.В., ДИБРОВА С.С., ПОДВОРОК И.И. *Регулирование негативного воздействия автотранспорта на окружающую среду с помощью стандартов моторного топлива (на примере Краснодарского края)* // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2015. – №39(324). – С. 48–60.
3. КРИВОНОЖНО В.Е., САФИН М.М., УТКИН О.Б., ЛЫЧЕВ А.В. *Программный комплекс «EffiVision» для анализа деятельности сложных систем* // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2005. – №3. – С. 85–95.
4. МЕЛЬНИКОВ Р.М. *Развитие методологии оценки эффективности научно-инновационных программ с учетом зарубежного опыта* // Инновации. – 2016. – №10. – С. 65–73.
5. ПИСКУНОВ А.А., ИВАНЮК И.И., ДАНИЛИНА Е.П., ЛЫЧЕВ А.В., КРИВОНОЖКО В.Е. *Система рейтингования регионов с использованием методологии АСФ* // Вестник АКСОР. – 2008. – №4. – С. 24–30.

6. РАТНЕР С.В., АЛМАСТЯН Н.А. *Метод согласования экологических приоритетов энергетических компаний и региональных социо-экономических систем* // Инновации. – 2016. – №9. – С. 40–47.
7. РАТНЕР С.В., ИОСИФОВ В.В. *Исследование динамики инвестиционных процессов в машиностроении на основе моделей с распределенными лагами* // Экономический анализ: теория и практика. – 2012. – №29. – С. 43–48
8. РАТНЕР С.В. *Задачи оптимизации траекторий развития региональных социо-экономических систем по экологическим параметрам* // Друкерровский вестник. – 2016. – №2. – С. 30–41.
9. РАТНЕР С.В. *Сетевой анализ среды функционирования в задачах регионального экологического менеджмента* // Проблемы управления. – 2016. – №6. – С. 35–46.
10. 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.
11. ХРУСТАЛЕВ Е.Ю., РАТНЕР П.Д. *Эко-инновации в электроэнергетике: оценка сравнительной эффективности* // Инновации. – 2015. – №9. – С. 8–14
12. BIAN Y., HE P., XU H. *Estimation of potential energy saving and carbon dioxide emission reduction in China based on an extended non-radial DEA approach* // Energy Policy. – 2013. – No. 63. – P.962–971.
13. CARRILLO M., JORGE J.M. *A multiobjective DEA approach to ranking alternatives* // Expert Systems With Applications. – 2016. – No. 50. – P. 130–139.
14. CHARNES A., COOPER W., RHODES E. *Evaluating program and managerial efficiency: An application of data envelopment analysis to program follow through* // Management Science. – 1981. – No. 27. – P. 668–697.
15. CHARNES A., CLARKE C., COOPER W., GOLANY B. *A development study of DEA in measuring the effect of mainte-*

- nance units in the U.S. Air Force* // Annals of Operation Research. – 1985. – No. 2. – P. 95–112.
16. CHUNG Y.H., FARE R., GROSSKOPF S. *Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach* // J. of Environmental Management. – 1997. – No. 51. – P. 229–240.
 17. COOPER W.W., SEIFORD L.M., TONE K. *Introduction to Data Envelopment Analysis and its Uses* // Springer Science. – 2006. – P. 351.
 18. FÄRE R., GROSSKOPF S. LOVELL C.A.K. *Production Frontiers*. – Cambridge University Press, 1994.
 19. FÄRE R., GROSSKOPF S. *Modelling undesirable factors in efficiency evaluation: comment* // European J. of Operational Research. – 2004. – No. 157. – P. 242–245.
 20. KORHONEN P.J., LUPTACIK M. *Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis* // European J. of Operational Research. – 2004. – No. 154. – P. 437–446.
 21. MALMQUIST S. *Index numbers and indifference surfaces* // Trabajos de Estadística. – 1953. – No. 4. – P. 209–242.
 22. SUEYOSHI T. *Comparison and analyses of managerial efficiency and returns to scale of telecommunication enterprises by using DEA/WINDOW* // Communications of the Operations Research Society of Japan. – 1992. – No. 37. – P. 210–219.
 23. WANG K., SHIWEI YU., ZHANG W. *China's regional energy and environmental efficiency: A DEA window analysis based dynamic evaluation* // Mathematical and Computer Modelling. – 2013. – No. 58. – P. 1117–1127.
 24. 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.

DYNAMIC PROBLEMS OF ESTIMATION OF ECOLOGICAL-ECONOMIC EFFICIENCY OF REGIONS BASED ON BASIC MODELS OF DATA ENVELOPMENT ANALYSIS

Svetlana Ratner, Institute of Control Science, RAS, Moscow, Doctor of Science, professor (lanarat@mail.ru).

Abstract: The paper describes the results of the comparative analysis of the applicability of several methods for solving dynamic DEA-models to the problem of monitoring of the ecological and economic efficiency of economic activities of regional economic systems (on the example of the regions of the Central Federal District, notably Belgorod and Ryazan regions). Methods of forming time series based on point estimates of environmental and economic efficiency, the Malkmquist method and the window method are considered. The results obtained for different window widths are analyzed for stability and adequacy. A comparison of the obtained results allows us to conclude that the window method is uniquely preferable for solving problems of monitoring the ecological and economic efficiency of regions not only from a computational but also from a substantive point of view. Unlike in case of Malkmquist method, system dynamics are more evident, and conclusions can be more easily drawn about the overall direction of the process. Data and graphs used in the comparison are also provided.

Keywords: data envelopment analysis, non-parametric optimization, dynamic tasks, window analysis.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии А.А. Ворониным.

*Поступила в редакцию 14.03.2017.
Опубликована 31.05.2017.*