

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭКО-ИННОВАЦИЯМИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ DEA С ЛАГАМИ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ВЫХОДАМИ

С.В. Ратнер

**Аннотация.** Разработан подход к оценке эффективности систем экологического менеджмента регионов России на основе применения моделей анализа среды функционирования (в англоязычном варианте — Data Envelopment Analysis, DEA). В качестве входов модели рассмотрены текущие и капитальные затраты на природоохранные мероприятия, в качестве выходов — изменения в нагрузке экономики региона на окружающую среду по широкому спектру экологических показателей. Отличительная особенность предложенного подхода состоит в учете отложенных эффектов от капитальных затрат на природоохранные мероприятия. Показана возможность применения процедуры сдвига шкал для устранения проблемы наличия отрицательных выходов. На основе комбинации эконометрических методов моделирования и методологии DEA построены динамические модели и проведена оценка уровня развития эко-инноваций в регионах России. Выявлено, что предложенная комбинация моделей и подходов позволяет в большей степени учесть экономическую логику процессов регионального экологического менеджмента, чем при традиционном способе выбора входов и выходов модели экологического DEA и, как следствие, точнее настроить систему стимулов государственной экологической политики.

**Ключевые слова:** анализ среды функционирования, отрицательные входы, отложенные эффекты, оптимизация, эко-инновации, региональная система экологического менеджмента.

## ВВЕДЕНИЕ

Местные органы власти представляют собой важные элементы институциональной структуры управления экологическими аспектами хозяйственной деятельности экономических агентов [1]. Это объясняется двумя основными причинами: с одной стороны, любые негативные последствия хозяйственной активности (как производственных процессов, так и процессов по обеспечению жизнедеятельности населения) быстрее всего ощущаются именно на локальном уровне и непосредственно влияют на качество жизни людей. С другой стороны, местные власти имеют возможность оказывать влияние на население посредством создания условий для развития технологических, продуктовых и организационных эко-инноваций, формирования экологически дружественных паттернов потребительского поведения, планирования застройки, образовательных и просветительских мероприятий и др. [2—5].

В Российской Федерации основные нормы и правила, регулирующие воздействие экономики на окружающую среду, устанавливаются на феде-

ральном уровне; тем не менее, региональным властям отводится большая роль в осуществлении ряда функций экологического менеджмента на местах. Так, функция государственного экологического мониторинга и надзора в области охраны атмосферного воздуха и в области обращения с отходами распределена между Росприроднадзором (федеральный уровень) и региональными властями. Функции государственного мониторинга радиационной обстановки, объектов животного мира, состояния лесов также распределены между федеральными и региональными органами власти. Вся статистическая информация по состоянию окружающей среды и по финансированию мероприятий по охране окружающей среды предоставляется населению в региональном разрезе. Все средства, собираемые с экономических агентов в качестве платы за негативное воздействие на окружающую среду и в качестве экологических штрафов за нарушение норм воздействия на окружающую среду, распределяются таким образом: 5 % от собираемых средств поступает в федеральный бюджет, 40 % в бюджеты субъектов РФ и 55 % в бюджеты муниципальных районов и городских округов. Функция распределения бюджетных средств на охрану ок-

ружающей среды и планирования мероприятий по улучшению экологического состояния региона полностью закреплена за министерствами экологии и охраны окружающей среды субъектов Российской Федерации [6].

В то же время какого-либо стандартизированного подхода к организации системы экологического менеджмента на региональном уровне в России не существует. Из наиболее распространенных в мире стандартов экологического менеджмента в России действует только стандарт ISO 14001, который определяет структуру и функции системы экологического менеджмента (СЭМ) предприятия, но не региона [7, 8]. Попытки применить принципы ISO 14001, в том числе принципа постоянного улучшения СЭМ, на региональном уровне в России пока не предпринимались, поэтому какая-либо системная оценка эффективности проводимой деятельности в области экологического менеджмента на территориальном уровне в настоящее время отсутствует.

Цель настоящей работы состоит в разработке подхода к оценке эффективности систем экологического менеджмента регионов РФ на основе статистических данных о состоянии окружающей среды и объемах средств, поступающих на финансирование мероприятий по охране окружающей среды, имеющих доступ. Эффективность СЭМ в данном исследовании предлагается понимать в чисто экономическом смысле: как отношение величины, характеризующей улучшение экологических аспектов экономики региона, к затратам, произведенным для достижения этого улучшения за период времени. Так как затраты, осуществляемые в регионах РФ на природоохранные мероприятия, бывают двух видов (текущие и капитальные), а улучшение экологических аспектов экономики региона может быть описано достаточно большим набором статистических показателей (снижение выбросов в атмосферу, снижение загрязнения природных водоемов, уменьшение отходов и др.), то для расчета единого количественного показателя эффективности СЭМ нами был применен подход, основанный на анализе среды функционирования (*англ.* Data Envelopment Analysis, DEA).

Практические приложения DEA-методологии в настоящее время активно развиваются как в зарубежной научной литературе, так и в российской, охватывая все новые области менеджмента и новые классы управленческих задач, включая задачи экологического менеджмента [9–12]. В качестве основных характерных особенностей анализа среды функционирования, обуславливающих его привлекательность в качестве инструмента поддержки принятия управленческих решений, можно указать такие возможности:

— проводить оценку эффективности деятельности экономических агентов, имея минимальные знания об используемых ими производственных функциях и технологиях только по статистическим данным об объемах потребляемых ими ресурсов и объемах выпуска полезной продукции,

— изучать различные аспекты функционирования сложных систем, варьируя выбор выходов и выходов модели DEA,

— выбирать для каждого неэффективного экономического агента (или системы) бенчмарки и оптимизировать свою стратегию достижения эффективности,

— пользоваться хорошо разработанными пакетами прикладных программ (в том числе, и программами открытого доступа) для расчета эффективности изучаемых объектов и принятия решений относительно неэффективных объектов.

В то же время базовые модели DEA, реализованные в пакетах прикладных программ, как правило, имеют некоторые ограничения на вид и тип входных и выходных значений [13]. В частности, в базовых моделях CCR (от первых букв имен авторов — Charnes, Cooper и Rhodes) с постоянным эффектом масштаба и BCC (от первых букв имен авторов — Banker, Charnes and Cooper) с переменным эффектом масштаба входы и выходы не могут принимать отрицательные значения. В реальности отрицательные значения выходов возможны в той ситуации, когда полезный результат производственной деятельности изучаемого экономического агента, несмотря на затраченные ресурсы, не достигнут на рассматриваемом временном промежутке.

Такого рода проблемы часто встречаются в задачах корпоративного и регионального экологического менеджмента: расходуемые на природоохранные мероприятия или экологический контроль и сертификацию средства экономических агентов или субъектов федерации не всегда достигают желаемой цели — сокращения объемов выбросов различных типов загрязняющих веществ. В таких случаях разница в объемах выбросов загрязняющих веществ в конечный и начальный моменты действия системы экологического менеджмента может быть отрицательной, что не позволяет применить базовые модели анализа среды функционирования к изучению сложившейся ситуации. Однако потенциал применения этих моделей значительный. Как показано в работах [9, 12, 13], варьирование различных входов и выходов, которыми может быть описана система экологического менеджмента, позволяет не только детально изучить отдельные аспекты ее работы, но и сделать вывод о типе развития экономического объекта в целом (линейный, циркулярный, устойчивый), а также уровне его эко-инновационной деятельно-



сти [14, 15]. Под эко-инновациями здесь понимаются не просто «все меры экономических агентов, которые разрабатывают и применяют на практике новые идеи, паттерны поведения, продукты и процессы, которые способствуют снижению нагрузки на окружающую среду» [16], но, в первую очередь, технологические инновации, т. е. внедрение наилучших доступных технологий [17]. При таком определении экономические агенты, внедряющие эко-инновации, гораздо быстрее сокращают свои удельные негативные экологические эффекты, чем агенты, применяющие старые производственные технологии.

В настоящей работе предложен подход к преодолению ограничений на значения выходов при работе с ориентированной по входам моделью ВСС в пакете MaxDEA, основанный на процедурах нормирования и сдвига шкалы, в которой измерены показатели результативности региональной системы экологического менеджмента (РСЭМ). Для рассмотрения изменений результативности РСЭМ в динамике в работе применяется «метод окна» [18–21], а для учета возможных эффектов запаздывания отдачи от инвестиций в технологические эко-инновации проводится предварительный непараметрический корреляционный анализ входных и выходных наборов данных.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОБ ОЦЕНКЕ УРОВНЯ РАЗВИТИЯ ЭКО-ИННОВАЦИЙ В РЕГИОНЕ

Рассмотрим в качестве производственных объектов (*англ.* Decision Making Units, DMU) региональные системы экологического менеджмента. Будем рассматривать в качестве входов данных объектов два статистических показателя — объем инвестиций в основной капитал, направленных на снижение загрязнений, и текущие затраты на природоохранные мероприятия. Согласно методологии статистического учета Федеральной службы государственной статистики, к инвестициям в основной капитал, направленным на охрану окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов, относятся затраты на строительство, реконструкцию (включая расширение и модернизацию) объектов, которые приводят к увеличению их первоначальной стоимости, приобретение машин, оборудования, транспортных средств, производственного и хозяйственного инвентаря, бухгалтерский учет которых осуществляется в порядке, установленном для учета вложений во внеоборотные активы. Очевидно, что проекты по строительству и реконструкции объектов природоохранного характера (очистных сооружений), а также введению в эксплуатацию сложного оборудования, могут иметь сроки реализации более одного года и, как следствие, оказывать положи-

тельное влияние на экологическую ситуацию только через определенный промежуток времени (лаг). К текущим затратам относятся затраты по содержанию и эксплуатации основных фондов природоохранного назначения, затраты на мероприятия по сохранению и восстановлению качества природной среды, нарушенной в результате производственной деятельности, на мероприятия по снижению вредного воздействия производственной деятельности на окружающую среду, по обращению с отходами производства и потребления, затраты на организацию контроля за выбросами (сбросами), отходами производства и потребления и за качественным состоянием компонентов природной среды, а также затраты на научно-исследовательские работы и работы по экологическому образованию кадров. Проекты такого рода, как правило, краткосрочны, и их положительные эффекты должны проявляться достаточно быстро. Однако и среди них вполне могут быть исключения, особенно в случае реализации проектов инновационного характера, требующих кардинальных изменений в системе экологического мониторинга, образования или исследований и разработок. В качестве выходов рассмотрим показатели снижения уровня загрязнений атмосферы и воды, т. е. разницу в объеме выбросов до инвестиций в основной капитал и текущих затрат на природоохранные мероприятия и после (моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ ,  $t_1 < t_2$ ). В случае эффективного расходования средств эта разница будет положительной, в случае неэффективного — отрицательной или нулевой. Как показатели развития уровня циркулярной экономики рассмотрим снижение уровня образования отходов производства и потребления, снижение уровня потребления свежей воды и повышение уровня развития переработки отходов.

Для того чтобы иметь возможность сопоставить разные по размеру и структуре экономики регионы, а также исключить воздействие на объемы выбросов такого фактора, как расширение производства, будем рассматривать разницу удельных показателей негативных экологических эффектов, т. е. показатели *интенсивности* воздействия на окружающую среду — выбросы и отходообразование на единицу произведенной продукции и долю переработки отходов:

$$y_{1,k} = \Delta_k^{EP} = \frac{EP_{t_1,k}}{GDP_{t_1,k}} - \frac{EP_{t_2,k}}{GDP_{t_2,k}};$$

$$y_{2,k} = \Delta_k^{ET} = \frac{ET_{t_1,k}}{GDP_{t_1,k}} - \frac{ET_{t_2,k}}{GDP_{t_2,k}};$$

$$y_{3,k} = \Delta_k^{SW} = \frac{SW_{t_1,k}}{GDP_{t_1,k}} - \frac{SW_{t_2,k}}{GDP_{t_2,k}};$$

$$\begin{aligned}
 y_{4,k} &= \Delta_k^W = \frac{W_{t1,k}}{GDP_{t1,k}} - \frac{W_{t2,k}}{GDP_{t2,k}}; \\
 y_{5,k} &= \Delta_k^{WT} = \frac{WT_{t1,k}}{GDP_{t1,k}} - \frac{WT_{t2,k}}{GDP_{t2,k}}; \\
 y_{6,k} &= \Delta_k^R = R_{t2,k} - R_{t1,k}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где  $EP$  — объем выбросов от стационарных источников;  $GDP$  — дефлированный (приведенный в цены базового года) валовый региональный продукт (ВРП);  $ET$  — объем выбросов от автомобильного транспорта;  $SW$  — объем сброса неочищенных сточных вод;  $W$  — объем потребления воды;  $WT$  — объем образования отходов;  $R$  — доля переработки отходов;  $k$  — номер региона.

При таком наборе входов и выходов в базовой модели анализа среды функционирования CCR решение оптимизационной задачи вида:

найти

$$\max_{u,v} \sum_{m=1}^M u_m y_{m0} \quad (2)$$

при ограничениях

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

$$\sum_{m=1}^M v_n x_{n0} = 1,$$

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

где 0 — индекс DMU;  $X$  — вектор входов размерности  $N$  ( $N = 2$ );  $Y$  — вектор выходов размерности  $M$  ( $M = 6$ );  $K$  — количество DMU (РСЭМ), позволит определить регионы, которые при минимальном объеме инвестиций в основной капитал, направленных на охрану окружающей среды, и минимальном объеме текущих затрат на природоохранные мероприятия добиваются максимальных значений показателей  $\Delta_k^j$ , полученных согласно выражениям (1). Очевидно, что достичь этого возможно лишь в случае внедрения эко-инноваций, т. е. наилучших доступных производственных технологий, а также перестройки дизайна производственных систем по моделям экономики замкнутых циклов (максимальное повторное использование продукции, переработка отходов) [14, 15].

Однако оценивать уровень развития эко-инновационной деятельности в регионе по результатам решения оптимизационной задачи DEA по данным одного года было бы неправильно. Для того чтобы сделать какие-либо содержательные выводы, необходимо рассмотреть изменения в эффективности РСЭМ на достаточно длительном проме-

жутке времени, как минимум 3—5 лет, т. е. решить динамическую задачу DEA. Как известно из литературных источников, одним из наиболее простых и дающих легко интерпретируемые результаты методов решения динамически задач DEA является так называемый метод окна [18—21]. Данный метод позволяет сравнить исследуемый объект по эффективности не только с другими аналогичными объектами, но и с самим собой в другие периоды времени. Для этого каждый из  $K$  рассматриваемых производственных объектов (в нашем случае РСЭМ) представляется в виде набора  $T$  однородных объектов  $PCЭM_i^{t1}, PCЭM_i^{t2}, \dots, PCЭM_i^T$  задаваемых входами  $X_i^{t1}, X_i^{t2}, \dots, X_i^T$  и выходами  $Y_i^{t1}, Y_i^{t2}, \dots, Y_i^T$ .

Базовая задача DEA вида (2) решается  $T - w + 1$  раз для  $K \times w$  ( $w \leq T$ ) производственных объектов  $PCЭM_i^j, PCЭM_i^{j+1}, \dots, PCЭM_i^{j+w}, \dots, PCЭM_K^j, PCЭM_K^{j+1}, \dots, PCЭM_K^{j+w}$ . Параметр  $w$  в данном методе называется шириной окна, а выбор его значения диктуется экономической или технологической логикой исследуемого процесса. Для решения задач, связанных с проблемами экологического менеджмента, как было доказано в работе [17], целесообразно установить максимальную ширину окна, равную всему периоду наблюдений, т. е. полагать  $w = T$ .

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТЛОЖЕННЫХ ЭФФЕКТОВ ЭКОНОМЕТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ВЫХОДОВ

Для определения величины временных лагов между входами и выходами модели DEA вида (2) воспользуемся методом непараметрического корреляционного анализа. Применение непараметрической корреляции объясняется отсутствием нормального распределения исходных данных. Для каждого года  $t_i$  из исследуемого периода (2011—2017 гг.) рассчитаем коэффициенты непараметрической корреляции  $\tau$ -Кендалла (как наиболее устойчивой непараметрической статистики) между вектором объемов инвестиций в основной капитал, направленных на снижение загрязнения окружающей среды (технологические эко-инновации)  $X_{t_i}^1$  и векторами  $\Delta_{t_i}^{EP}, \Delta_{t_i+1}^{EP}, \dots, \Delta_T^{EP}, \Delta_{t_i}^{ET}, \Delta_{t_i+1}^{ET}, \dots, \Delta_T^{ET}, \Delta_{t_i}^{SW}, \Delta_{t_i+1}^{SW}, \dots, \Delta_T^{SW}, \Delta_{t_i}^W, \Delta_{t_i+1}^W, \dots, \Delta_T^W, \Delta_{t_i}^{WT}, \Delta_{t_i+1}^{WT}, \dots, \Delta_T^{WT}$  и  $\Delta_{t_i}^R, \Delta_{t_i+1}^R, \dots, \Delta_T^R$ . Далее аналогичным образом рассчитаем коэффициенты корреляции  $\tau$ -Кен-



Кoeffициенты корреляции между входами и выходами модели DEA с лагами различной длины

Вход	Выход					
	$\Delta^{EP}$	$\Delta^{ET}$	$\Delta^{SW}$	$\Delta^W$	$\Delta^{WT}$	$\Delta^R$
$X_{2011}^1$	Лag 0: 0,23	—	—	—	Лag 3: 0,16	—
$X_{2011}^2$	Лag 0: 0,23	Лag 3: 0,15	Лag 4: 0,15	—	—	Лag 5: 0,2
$X_{2013}^1$	Лag 4: 0,26	—	Лag 2: 0,16	Лag 3: 0,15	Лag 1: 0,17	—
$X_{2013}^2$	Лag 4: 0,24	Лag 2: 0,16	—	Лag 4: 0,18	—	Лag 3: 0,2
$X_{2015}^1$	Лag 2: 0,2	—	—	—	—	Лag 1: 0,19
$X_{2015}^2$	Лag 2: 0,26	Лag 2: 0,19	Лag 2: 0,19	Лag 2: 0,17	—	Лag 0: 0,21
$X_{2017}^1$	Лag 0: 0,19	—	—	—	—	—
$X_{2017}^2$	Лag 0: 0,26	Лag 0: 0,16	Лag 0: 0,17	Лag 0: 0,16	—	—

далла между вектором текущих затрат на природоохранные мероприятия  $X_{t_i}^2$  и всеми векторами результатов в моменты  $t_i, t_{i+1}, \dots, T$ . Для устранения влияния инфляции все значения инвестиций и текущих затрат предварительно приведем к ценам базового года<sup>1</sup>.

Результаты расчетов по выборке из 80 регионов России (за исключением Республики Крым, г. Севастополя и некоторых автономных округов, входящих в состав более крупных субъектов РФ) представлены в табл. 1. В рассмотрение включены годы, по которым имеются все статистические данные. Представлены только статистически значимые коэффициенты корреляции на уровне  $p = 0,05$ . В случае, если статистически значимыми оказывались коэффициенты корреляции на двух лагах, выбирался наибольший по значению.

Как можно заметить из анализа результатов расчетов, представленных в табл. 1, затраты на природоохранные мероприятия обоих видов, произведенные в 2011 г., принесли максимальный эффект по сокращению интенсивности выбросов от стационарных источников в тот же год, по сокращению интенсивности выбросов от транспорта — через два года, по сокращению интенсивности сброса сточных вод — через три года, по сокращению

интенсивности образования отходов — через два года, по увеличению доли переработки отходов — через четыре года. Поэтому для формирования входов и выходов модели DEA по расчету эффективности РСЭМ 2011 г., будем пользоваться значениями затрат 2011 г., а значениями экологических эффектов — с соответствующими сдвигами во времени. Несмотря на сдвиг во времени максимальных экологических эффектов, мы будем их считать эффектами работы РСЭМ 2011 г., так как все управленческие решения по выбору природоохранных мероприятий для финансирования принимались именно в этом году.

Далее рассмотрим проблему отрицательных значений выходов. Как показали выполненные нами расчеты значений экологических эффектов в соответствии с формулами (1), далеко не все регионы демонстрируют положительную динамику снижения нагрузки на окружающую среду и роста уровня развития циркулярной экономики. Для примера на рис. 1 приведено число регионов, имеющих отрицательные значения разности в интенсивности выбросов от стационарных источников до и после произведенных затрат на природоохранные мероприятия.

Для перевода отрицательных значений выходов в положительные, позволяющие применить базовые модели DEA для определения уровня развития эко-инновационной деятельности в регионах, проведем процедуры сдвига шкал, в которых выходы изменены по формуле:

$$z_{i,j} = y_{i,j} + |\min y_{i,j}| + 0,001. \quad (3)$$

Введенное преобразование позволяет избавиться от отрицательных и нулевых значений выходов, не нарушая при этом логику формирования и решения модели анализа среды функционирования [22—25].

<sup>1</sup> Данные получены из различных статистических сборников. Данные по затратам на охрану окружающей среды (текущие затраты и инвестиции в основной капитал), объемам выбросов, сбросу неочищенных сточных вод, объему потребления свежей воды, объему образования отходов и доле переработки получены из статистических сборников «Охрана окружающей среды в России» за 2018, 2016, 2014 и 2012 гг. (Приложение. Данные в разрезе субъектов РФ). Данные по объему ВРП получены из статистического сборника «Регионы России. Социально-экономические показатели» за 2018 г., дефлирование методом цепных индексов выполнено автором.

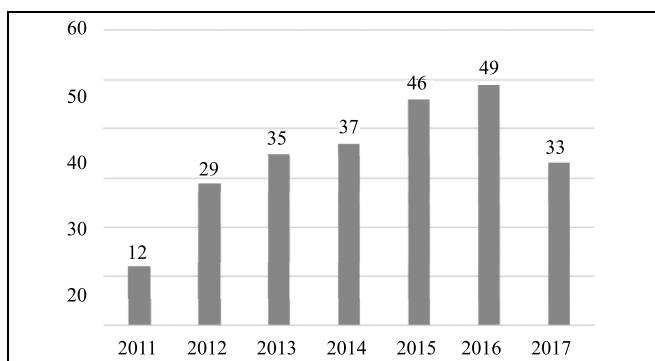


Рис. 1. Число регионов, не имеющих положительной динамики в снижении интенсивности выбросов загрязняющих веществ в атмосферу

Проведенные предварительные преобразования выходов модели DEA, направленные на учет эффектов запаздывания отдачи от инвестиций в природоохранные мероприятия и устранение технических препятствий для применения базовых программных комплексов решения задач анализа среды функционирования (например, MaxDEA), позволяют далее приступить к непосредственному расчету динамики коэффициентов эффективности РСЭМ по модели ВСС, ориентированной по входам (input-oriented). Выбор модели ВСС объясняется тем, что она позволяет, помимо расчетов коэффициентов эффективности, также определить наличие и тип эффекта масштаба, что важно для принятия обоснованных управленческих решений [26, 27]. Кроме того, в отличие от модели ССР, модель ВСС допускает преобразования входных или выходных данных путем сдвига шкалы, однако такое преобразование может быть применено либо только к входам, либо только к выходам, но не к входам и выходам одновременно [22–25].

Итак, в результате проведенных преобразований с выходами и выбора ширины окна для решения динамической задачи, равной всему исследуемому промежутку, задача (2) примет вид:

$$\max_{u, v} \sum_{m=1}^M u_m z_{m0}^{t^*}$$

при ограничениях

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

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

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

где  $X^t = (x_{10}^t, \dots, x_{N0}^t) \geq 0$  — вектор входов размерности  $N$  в момент времени  $t$ ;  $Z^{t^*} = (z_{10}^{t^*}, \dots, z_{M0}^{t^*}) \geq 0$  —

вектор выходов размерности  $M$  в момент времени  $t^*$ , соответствующий временному лагу максимальной отдачи от вложенных инвестиций в эко-инновации;  $K$  — число региональных СЭМ;  $w$  — ширина окна (число дискретных моментов времени в рассматриваемом периоде);  $u_m, v_n$  — неизвестные неотрицательные веса, подлежащие определению.

### 3. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭКО-ИННОВАЦИОННЫМ РАЗВИТИЕМ РЕГИОНОВ

Результаты решения задачи (3) с переменной отдачей от масштаба, полученные по периоду с 2011 по 2017 г. с шагом два года, представлены в табл. 2. Расчеты проводились с помощью открытого программного обеспечения MaxDEA. Выбор временного периода для проведения анализа эффективности региональных СЭМ и шага размером в два года объясняется доступностью статистических данных.

Пропуск в табл. 2 значения коэффициента эффективности РСЭМ Республики Ингушетия в 2011 г. объясняется тем, что в этом году значения объемов инвестиций в основной капитал, направленных на предотвращение загрязняющей среды, и значения объемов текущих затрат на природоохранную деятельность равны нулю, т. е. в данный период времени РСЭМ Республики Ингушетия фактически не работала.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что за исключением РСЭМ Кемеровской области, ни одна из региональных систем экологического менеджмента не работает со стабильно высокой эффективностью. В среднем наибольшие значения эффективности РСЭМ наблюдаются в 2011 г., в 2013 г. эффективность региональных систем экологического менеджмента в среднем довольно резко падает и далее медленно возвращается к значениям 2011 г. только в 2017 г. (рис. 2).

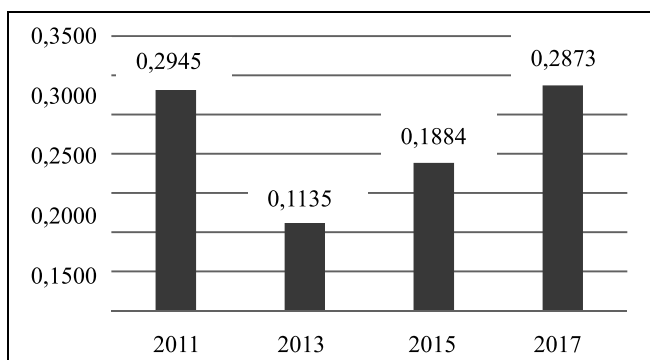


Рис. 2. Динамика эффективности РСЭМ в целом по России. Источник: расчеты автора

## Результаты расчетов коэффициентов эффективности РСЭМ методом окна за период 2011—2017 гг. с шагом два года

Регион	2011 г.	2013 г.	2015 г.	2017 г.
Белгородская область	0,0131	0,0006	0,0012	0,0031
Брянская область	1	0,0430	1	1
Владимирская область	0,0341	0,0175	0,0095	0,0101
Воронежская область	0,0841	0,0020	0,0021	0,0016
Ивановская область	0,2587	0,3017	1	1
Калужская область	0,0222	0,0030	0,0187	0,0149
Костромская область	1	0,2285	0,3214	1
Курская область	0,0083	0,0201	0,0227	0,0127
Липецкая область	0,1124	0,0048	0,0038	0,0068
Московская область	0,0055	0,0018	0,0039	1
Орловская область	0,0480	0,0154	0,0152	0,0654
Рязанская область	0,4682	0,0344	0,0410	0,0168
Смоленская область	0,0537	0,0287	0,0062	0,1106
Тамбовская область	0,1035	0,0053	0,0048	0,0419
Тверская область	0,0012	0,0974	0,0135	0,0233
Тульская область	0,0109	0,1738	0,1691	0,1915
Ярославская область	0,0539	0,0709	0,0504	0,0336
г. Москва	0,0057	0,0051	0,0042	0,0011
Республика Карелия	1	0,0938	0,0771	0,0990
Республика Коми	0,0024	1	1	1
Архангельская область	1	0,0215	0,0081	0,0063
Вологодская область	0,9717	0,0238	0,0573	0,0452
Калининградская область	0,0337	0,0063	0,1554	0,0068
Ленинградская область	0,0859	0,0056	0,0204	1
Мурманская область	0,4197	0,0151	0,0171	0,0016
Новгородская область	1	0,1439	1	1
Псковская область	0,2147	0,0015	0,0065	0,0140
г. Санкт-Петербург	0,0074	0,0101	0,0058	0,0007
Республика Адыгея	1	0,1736	0,7046	1
Республика Дагестан	1	0,0106	0,0272	0,0528
Республика Ингушетия	-	1	0,0705	1
Кабардино-Балкарская Республика	1	0,0208	0,0310	1
Республика Калмыкия	1	0,2985	0,7414	1
Карачаево-Черкесская Республика	1	0,0150	1	0,0597
Республика Северная Осетия — Алания	0,1220	0,0772	0,0282	0,5887
Чеченская Республика	1	1	1	1
Краснодарский край	0,0155	0,0068	0,0207	0,0097
Ставропольский край	0,0090	0,0023	0,0022	0,0033
Астраханская область	0,0355	1	0,8120	1
Волгоградская область	0,2546	0,0652	0,0188	0,0143
Ростовская область	0,9810	0,0011	0,0024	0,0163
Республика Башкортостан	0,0098	0,0044	0,0052	0,0082
Республика Марий Эл	1	0,7532	1	0,1104
Республика Мордовия	0,0301	0,0028	0,0031	0,4800
Республика Татарстан	0,0048	0,0047	0,0062	0,0073
Удмуртская Республика	0,0461	0,0243	0,0417	0,0880
Чувашская Республика	0,0311	0,0065	0,0037	1
Пермский край	0,0297	0,0036	0,0095	0,0103
Кировская область	0,0569	0,0124	0,5408	1
Нижегородская область	0,0230	0,0009	0,0021	0,0023
Оренбургская область	0,0394	0,1081	0,1524	0,2055
Пензенская область	0,0268	0,0961	0,0552	0,2096
Самарская область	0,0229	0,0012	0,0011	0,0013
Саратовская область	0,0031	0,0015	0,0018	0,0018
Ульяновская область	0,0446	0,0198	0,0490	0,0303
Курганская область	0,2261	0,0066	0,0074	0,0070

Регион	2011 г.	2013 г.	2015 г.	2017 г.
Свердловская область	0,1212	0,0010	0,0019	0,0017
Тюменская область	0,0153	0,0077	0,0396	0,0340
Челябинская область	0,1589	0,0831	0,0789	0,0492
Республика Алтай	0,1427	0,0212	0,0641	0,0417
Республика Бурятия	0,7103	0,0631	0,1058	0,5157
Республика Тыва	1	0,3246	1	1
Республика Хакасия	0,6857	0,0044	0,0035	0,0066
Алтайский край	0,0925	0,0196	0,0221	1
Забайкальский край	0,9285	0,0063	0,0079	0,0706
Красноярский край	0,0111	0,0077	0,0082	0,0076
Иркутская область	0,0168	0,0057	0,0083	0,0160
Кемеровская область	0,5830	0,4470	1	1
Новосибирская область	0,0431	0,0107	0,0085	1
Омская область	0,0437	0,0190	0,0089	0,0040
Томская область	0,0091	0,1791	0,1978	0,2862
Республика Саха (Якутия)	0,0493	0,0089	0,0082	0,0030
Приморский край	0,0612	0,0049	0,0152	0,0098
Хабаровский край	0,0034	0,0029	0,0011	0,0040
Амурская область	0,0245	0,0055	0,0085	0,2114
Камчатский край	0,1130	0,0047	0,0143	0,0080
Магаданская область	0,1008	0,0211	0,0092	0,0059
Сахалинская область	0,0281	0,0084	0,0041	0,0089
Еврейская автономная область	0,5847	0,0138	0,0791	0,0283
Чукотский автономный округ	1	0,7177	1	0,0577

Максимальные значения эффективности демонстрируют в тот или иной год, как правило, РСЭМ небольших по размеру экономики и численности населения регионов: большинство республик Северного Кавказа, республики Адыгея, Калмыкия, Коми, Тыва, Марий Эл, Брянская и Новгородская области, Чукотский АО. Из регионов с развитой промышленностью максимальную эффективность экологического менеджмента хотя бы раз за исследуемый период показывают только Ивановская, Костромская, Московская, Кировская, Кемеровская и Новосибирская области.

В разрезе федеральных округов наиболее высокие показатели эффективности РСЭМ демонстрируют Северо-Кавказский и Южный Федеральный округа, в составе которых как раз много регионов с малыми размерами экономики и регионов с аграрной ориентацией. Наименьшие показатели эффективности РСЭМ наблюдаются в Уральском Федеральном округе (рис. 3).

Рассмотрев в отдельности эффективность РСЭМ для пяти наиболее густонаселенных регионов — г. Москвы, Московской области, Краснодарского края, г. Санкт-Петербурга и Свердловской области, можно отметить, что все они демонстрируют крайне низкие значения коэффициентов эффективности на протяжении 2011—2015 гг. (рис. 4). В 2017 г. ситуация сохраняется для всех крупных регионов, кроме Московской области, РСЭМ которой демонстрирует максимальную эф-

фективность (см. табл. 2), что, судя по статистическим показателям, объясняется запуском нескольких новых проектов по переработке мусора.

Выявленная ситуация с низкой эффективностью РСЭМ крупных регионов подтверждается результатами анализа значений эффекта масштаба исследуемых объектов. Согласно выполненным расчетам, все региональные СЭМ (кроме РСЭМ Республики Ингушетия с нулевыми значениями инвестиций в основной капитал) имеют убывающую отдачу от масштаба на всем протяжении ис-

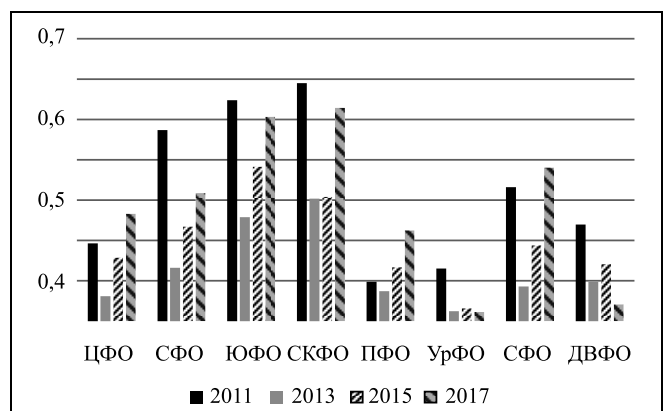


Рис. 3. Динамика средних значений эффективности РСЭМ в разрезе федеральных округов.  
Источник: расчеты автора



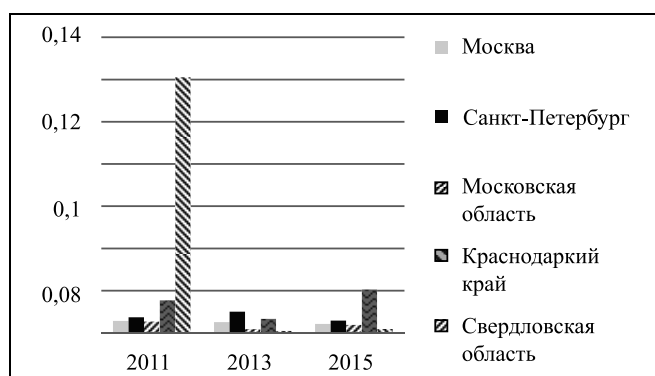


Рис. 4. Динамика эффективности СЭМ наиболее густонаселенных регионов России в 2011–2015 гг. (Источник — расчеты автора)

следуемого периода. Это означает, что увеличение входов модели (3) на некоторую величину  $\Delta_1$  приводит к увеличению выходов на величину  $\Delta_2$ , где  $\Delta_1 > \Delta_2$ , или, согласно содержательной постановке задачи, все большее увеличение финансирования природоохранных мероприятий дает все меньшее снижение негативных экологических эффектов. Поэтому регионы со скромным финансированием природоохранной деятельности добиваются лучших результатов (в относительном выражении), нежели крупные регионы с существенными объемами финансирования. С содержательной точки зрения такая ситуация говорит о низком уровне развития эко-инноваций или их полном отсутствии.

#### 4. ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ DEA И НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

Итак, основная особенность предложенного подхода к построению модели DEA для анализа эффективности РСЭМ состоит именно в ориентации на идентификацию и оценку уровня развития эко-инноваций. Учет временных лагов между входами и выходами модели позволяет исключить такие ситуации, когда затратные и длительные по разработке и внедрению проекты развития процессных, продуктовых и организационных эко-инноваций выпадают из рассмотрения на выбранном для анализа временном промежутке. Отметим, что динамические задачи DEA меньше подвержены риску постановки и интерпретации результатов, недостаточно адекватных реальной картине управленческого процесса. При исследовании изменения эффективности РСЭМ в динамике вероятность того, что активно развивающиеся эко-инновации регионы будут признаны неэффективными на всем временном промежутке исследования, снижается, так резкое изменение динамики удельных негативных воздействий на окружающую среду

(выходов) будет так или иначе заметно и учтено при расчетах на более позднем периоде, чем тот, в котором проект был непосредственно запущен. Такого рода исследование было проведено ранее в работе [20], и в целом его результаты показали хорошее соответствие общей логике исследуемых процессов.

Однако пошаговое изменение эффективности РСЭМ на исследуемом интервале при таком подходе невозможно, более того, отделить РСЭМ, которые внедряют эко-инновации, от тех, которые просто следуют за общими тенденциями модернизации устаревших производств, также не представляется возможным. Особенно сложны для интерпретации становятся те случаи, когда затраты на природоохранную деятельность не возрастают или убывают монотонно, а совершают резкие скачки, что, как показало проведенное исследование, пока что представляет собой обычную практику для большинства регионов России. Таким образом, предложенный в данной работе подход позволяет получить более точные результаты и отделить те регионы, которые добиваются улучшения благодаря развитию эко-инновационной деятельности от тех, которые применяют традиционные практики эко-менеджмента (квотирование выбросов, плата за загрязнение, штрафы и др.).

Что касается применения метода непараметрического корреляционного анализа, то в отличие от других эконометрических методов, также позволяющих выявить наличие или отсутствие временных лагов между входами и выходами модели, его применение возможно и корректно как в случае отсутствия нормального распределения данных в выборках входных и выходных значений, так и в случае нелинейных зависимостей между входами и выходами. Оба эти случая характерны для решаемой в данной работе задачи.

Еще одним способом учета отложенных эффектов инвестиций в развитие эко-инноваций теоретически может быть применение моделей DEA с переменными типа запаса и типа потока [28], в которых осуществляется переход от рассмотрения эффективности производственного объекта (РСЭМ) в каждый определенный момент времени к изучению *пути* развития производственного объекта. Такие модификации метода анализа среды функционирования изменяют постановку оптимизационной задачи и накладывают определенные дополнительные ограничения на свойства множества производственных возможностей. Однако, как подтверждают результаты проведенного нами в данной работе корреляционного анализа, разные выходные переменные могут иметь лаги разной длины, что значительно усложняет вычислительную сложность задачи. Кроме того, определение объема инвестиций в основной капитал, направ-

ленных на снижение загрязнений и текущих затрат на природоохранные мероприятия, как переменных типа запаса не вполне соответствует экономической логике исследуемого процесса, так как в реальности данные объемы формируются за счет экологических штрафов и налогов, а не за счет положительных эффектов действия РСЭМ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы сфера применения моделей DEA значительно расширилась, в том числе благодаря активному применению данной методологии в задачах экологического менеджмента. Решение задач DEA позволяет анализировать сравнительную эффективность деятельности однородных по набору входов и выходов объектов, в роли которых могут выступать практически любые экономические агенты — от отдельных производственных подразделений одного предприятия до регионов и даже стран. Развитие программных продуктов, реализующих различные модели DEA, позволяет перенести фокус внимания исследователя от вопросов технической реализации метода и преодоления вычислительных сложностей на вопросы корректной экономико-управленческой интерпретации полученных результатов. Корректность интерпретации, в свою очередь, в существенной степени определяется правильностью выбора входов и выходов модели DEA.

В настоящей работе предложена новая постановка модели DEA сравнительной оценки качества экологического менеджмента на региональном уровне и рассмотрены вопросы учета отложенных эффектов от затрат на эко-инновации. Ее отличительная особенность состоит в предварительном анализе зависимостей между входами и выходами модели методом непараметрической корреляции. Показана возможность применения процедуры сдвига шкал для устранения проблемы наличия отрицательных выходов. С помощью метода окна (window method) построены динамические модели и проведена оценка уровня развития эко-инноваций в регионах России. Выявлено, что предложенная комбинация моделей и подходов позволяет в большей степени учесть экономическую логику процессов регионального экологического менеджмента, чем при традиционном способе выбора входов и выходов модели экологического DEA и, как следствие, точнее настроить систему стимулов государственной экологической политики.

Заметим, что несмотря на некоторое кажущееся (при поверхностном рассмотрении) сходство с постановкой задачи, предложенной в предыдущей работе автора [18], набор входов в данной задаче совершенно иной, что не позволяет напрямую сравнивать полученные результаты. В насто-

ящей работе в качестве входов рассматриваются затраты региона на охрану окружающей среды. Наличие затрат рассматривается как первый признак наличия управления в природоохранной сфере. Затраты как управляющее воздействие может осуществлять система экологического менеджмента региона. Откликами в данной модели служат изменения в объемах негативных воздействий, оказываемых экономикой на окружающую среду. Предполагается, что производимые затраты должны снижать негативное воздействие экономики региона на окружающую среду, причем не столько в абсолютных показателях (например, объемы разного рода выбросов), но прежде всего — в удельных показателях, т. е. показателях интенсивности негативного воздействия экономики региона на окружающую среду.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Brugmann, J.* Planning for Sustainability at the Local Government Level // *Environmental Impact Assessment Review*. — 1996. — Vol. 16 (4–6). — P. 363–379.
2. *Petrosillo, I., De Marco, A., Botta, S., Comoglio, C.* EMAS in Local Authorities: Suitable Indicators in Adopting Environmental Management Systems // *Ecological Indicators*. — 2012. — Vol. 13. — P. 263–274.
3. *Domingues, A.R., Pires, S.M., Caeiro, S., Ramos, T.B.* Defining criteria and indicators for a sustainability label of local public services // *Ecological Indicators*. — 2015. — Vol. 57. — P. 452–464.
4. *Emilsson, S., Hjelm, O.* Development of the use of standardized environmental management systems (EMSs) in local authorities // *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*. — 2005. — Vol. 12 (3). — P. 144–156.
5. *Lozano, M., Valles, J.* An analysis of the implementation of an environmental management system in a local public administration // *Journal of Environmental Management*. — 2007. — Vol. 82. — P. 485–511.
6. *Ковалев А.О.* Институциональная структура регионального экологического менеджмента в Российской Федерации // *Друкерровский вестник*. — 2019. — № 3. — С. 351–368. [*Kovalev, A.O.* Institutional structure of the regional ecological management of the Russian Federation // *Drukerovskij vestnik*. — 2019. — No. 3. — P. 351–368. (In Russian)]
7. *Рябчун Е.С., Алмастьян Н.А.* Управление изменениями качества городской среды: перспективы применения стандарта ИСО 37120 в городах России // *Друкерровский вестник*. — 2019. — № 3. — С. 369–380. [*Ryabchun, E.S., Almastyan, N.A.* Change management of the quality of urban environment: ISO 37120 application prospects of in the Russian Cities // *Drukerovskij vestnik*. — 2019. — No. 3. — P. 369–380. (In Russian)]
8. *Суворова А.В.* Цель, задачи и принципы регионального экологического менеджмента // *Региональная экономика: теория и практика*. — 2004. — № 2. — С. 67–70. [*Suvorova, A.V.* Tsel', zadachi i printsipy regional'nogo ekologicheskogo menedzhmenta // *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika*. — 2004. — No. 2. — S. 67–70. (In Russian)]
9. *Zhou, H., Yang, Y., Chen, Y., Zhu, J.* Data envelopment analysis in sustainability: The origins, development and future directions // *European Journal of Operational Research*. — 2018. — Vol. 264, no. 1. — P. 1–16.
10. *Liu, J., Gong, Y., Zhu, J., Zhong, J.* A DEA-based approach for competitive environment analysis in global strategies // *International Journal of Production Economics*. — 2018. — Vol. 203. — P. 110–123.



11. *Ratner S.V.* Сетевой анализ среды функционирования в задачах регионального экологического менеджмента // Проблемы управления. — 2016. — № 6. — С. 35–46. [*Ratner, S.V.* Network data envelopment analysis in regional environmental management problems // *Control Sciences* — 2016. — No. 6. — P. 35–46. (In Russian)]
12. *Алмастьян Н.А.* Разработка стратегий природоохранной деятельности в регионе на основе моделей непараметрической оптимизации // *Modern Economy Success*. — 2017. — № 6. — С. 107–116. [*Almastyan, N.A.* Development of strategies for environmental activities in the region based on the models of non-parametric optimization. — *Modern Economy Success*. — 2017. — No. 6. — P. 107–116. (In Russian)]
13. *Wang, Q., Sun, Y., Yuan, X., et al.* Addressing efficiency of the core ecological industrial chains: A DEA — approach // *Journal of Cleaner Production*. — 2017. — Vol. 156. — P. 235–243.
14. *Jesus, A., Antunes, P., Santos, R., Mendonca, S.* Eco-innovation in the transition to a circular economy: An analytical literature review // *Journal of Cleaner Production*. — 2018. — Vol. 172. — P. 2999–3018.
15. *Korhonen, J., Honkasalo, A., Seppälä, J.* Circular Economy: The Concept and its Limitations // *Ecological Economics*. — 2018. — Vol. 143. — P. 37–46.
16. *Rennings, K.* Towards a Theory and Policy of Eco-Innovation — Neoclassical and (Co-) Evolutionary Perspectives // *ZEW Discussion Papers*. — 1998. — No. 98–24.
17. *Li, Y.* Environmental innovation practices and performance: moderating effect of resource commitment // *Journal of Cleaner Production*. — 2014. — Vol. 66. — P. 450–458.
18. *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. [*Ratner, S.V.* Dynamic problems of estimation of ecological-economic efficiency of regions based on basic models of data envelopment analysis // *Large-Scale Systems in Control*. — 2017. — Iss. 67. — P. 81–106. (In Russian)]
19. *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.
20. *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. — Vol. 58, iss. 5–6. — P.1117–1127.
21. *Ratner S., Ratner P.* DEA-based Dynamic Assessment of Regional Environmental Efficiency// *Applied Computer Science*. — 2017. — Vol.13, no. 2. — P. 48–60.
22. *Ali, A.I., Seiford, L.M.* Translation-invariance in data envelopment analysis // *Operations Research Letters*. — 1990. — No. 9(6). — P. 403–405.
23. *Knox Lovell, C.A., & Pastor, J.T.* Units invariant and translation invariant DEA models // *Operations Research Letters*. — 1995. — No. 18 (3). — P. 147–151.
24. *Pastor, J.T.* Chapter 3 Translation invariance in data envelopment analysis: A generalization // *Annals of Operations Research*. — 1996. — No. 66(2). — P. 91–102.
25. *Ratner, S., Ratner, P.* Measuring Efficiencies of Regional Eco-Management Systems with DEA // *Proceedings of IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. IEEE Catalog Number: CFP1756H-PRT ISBN: 978-1-5386-0500-4. — Vol. 2. — P. 256–259.
26. *Cooper, W.W., Seiford, L.M., Tone, K.* Introduction to Data Envelopment Analysis and its Uses. — Springer Science, 2006. — P. 351.
27. *Fare, R., Grosskopf, S., Lovell, C.A.K.* *Production Frontiers*. — Cambridge: Cambridge University Press, 1994. — 312 p.
28. *Emrouznejad, A., Thanassoulis, E.* A Mathematical Model for Dynamic Efficiency Using Data Envelopment Analysis // *Applied Mathematics and Computation*. — 2005. — No. 160. — P. 363–378.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии М.И. Гераськиным.*

*Поступила в редакцию 17.07.2019, после доработки 3.02.2020.  
Принята к публикации 5.03.2020.*

**Ратнер Светлана Валерьевна** — д-р экон. наук,  
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,  
г. Москва, ✉ lanarat@mail.ru.

## EVALUATION OF EFFICIENCY OF ECO-INNOVATION MANAGEMENT BASED ON DEA MODELS WITH LAGS AND NEGATIVE OUTPUTS

S.V. Ratner

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ lanarat@mail.ru

**Abstract.** The article develops a new approach to assessing the effectiveness of environmental management systems in Russian regions based on the use of DEA models. The current and capital expenditures on environmental protection measures are considered as inputs of the model, and the changes in the load of the regional economy on the environment in a wide range of environmental indicators are considered as outputs. A distinctive feature of the proposed approach is the accounting for delayed effects of capital expenditures on environmental protection measures. The possibility of applying the scale shift procedure to eliminate the problem of the presence of negative outputs is shown. Based on a combination of econometric modeling methods and DEA methodology, dynamic models were constructed and the level of eco-innovation development in Russian regions was assessed. It has been revealed that the proposed combination of models and approaches allows better taking into account the economic logic of regional environmental management processes in comparison to the traditional method of selecting inputs and outputs of the environmental DEA model and, as a result, setting the incentives system of the state environmental policy more precisely.

**Keywords:** analysis of the functioning environment, negative inputs, delayed effects, optimization, eco-innovations, regional environmental management system.