

УДК 338.2  
ББК 65.05.3

## **ФОРМИРОВАНИЕ СТРАТЕГИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩИХ КОМПАНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОЛОГИИ АНАЛИЗА СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ<sup>1</sup>**

**Ратнер С. В.<sup>2</sup>,**

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

**Ратнер П. Д.<sup>3</sup>**

*(Российский экономический университет  
им. Г.В. Плеханова, Краснодарский филиал, Краснодар)*

*Изучается возможность применения методологии анализа среды функционирования (АСФ) – непараметрического метода оптимизации к решению задач экологического менеджмента предприятий электроэнергетической отрасли. Анализируются способы учета нежелательных выходов, строится алгоритм последовательного двойного применения базовой модели АСФ для решения задачи формирования оптимальной по набору экологических и экономических параметров стратегии природоохранной деятельности генерирующих компаний. Проводится апробация алгоритма на статистических данных по экологическим эффектам деятельности генерирующих компаний России. Обсуждаются возможности использования метода на практике.*

---

<sup>1</sup> 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».

<sup>2</sup> Светлана Валерьевна Ратнер, доктор экономических наук (laparat@mail.ru, тел. (495) 334-79-00).

<sup>3</sup> Павел Дмитриевич Ратнер, студент (ratner.p.d@gmail.com).

Ключевые слова: анализ среды функционирования, непараметрическая оптимизация, экологические эффекты, электроэнергетика.

## **1. Введение**

В настоящее время электроэнергетические объекты, работающие на углеводородном топливе, являются одними из основных эмитентов парниковых газов и других загрязняющих веществ (16% общероссийских выбросов от стационарных источников), крупными потребителями свежей воды (35% общего использования водных ресурсов по России), загрязнителями почв, подземных и поверхностных вод. Повышение экологической эффективности деятельности предприятий электроэнергетики является одним из наиболее важных условий обеспечения устойчивого развития как отрасли, так и страны в целом. Одной из важнейших проблем экологической оптимизации развития электроэнергетики является максимальное сокращение негативных воздействий на окружающую среду с использованием различных природоохранных мероприятий (как технологического характера, так и организационных) при сохранении существующих объемов выработки электроэнергии [4].

Приоритеты инвестиционной деятельности электрогенерирующих компаний, направленной на снижение негативных экологических эффектов, определяются, в основном, существующей на сегодняшний день системой экологических платежей и штрафов за сверхнормативные выбросы и мало учитывают реалии экологической ситуации в регионах. В большинстве литературных источников действующие в России экономические механизмы и стимулы к минимизации негативного воздействия на окружающую среду электроэнергетическими объектами признаны неэффективными (см., например, работы [3, 5]).

В то же время успешных примеров перехода на экологически чистые технологии генерации энергии в масштабах региональных и национальных энергетических систем в мировой практике на сегодняшний день пока нет. Хорошо известные ситуации бразильского энергетического кризиса 2001 года,

связанного с засухой и нехваткой воды для обеспечения стабильной работы гидроэлектростанций (производят около 40% всей потребляемой в стране электроэнергии) [15], китайского экологического кризиса последних лет, вызванного увеличением объемов генерации энергии на угольных станциях [18], проблемы непропорционально интенсивного роста количества солнечных электростанций в Чехии [16] иллюстрируют сложный и комплексный характер задачи разработки оптимальной конфигурации энергетической системы. Отсутствие полного понимания влияния некоторых процессов генерации энергии на экосистемы и недостаточное внимание к экологическим аспектам при проектировании конфигурации энергетической систем может привести к неожиданным и нежелательным последствиям, когда положительный эффект от снижения негативного воздействия на окружающую среду по одному параметру (или группе параметров) полностью нивелируется увеличением нагрузки на экосистемы по другому параметру (или группе параметров). Так, например, известно, что использование технологий улавливания CO<sub>2</sub> в целях сокращения объемов выбросов парниковых газов приводит к существенному увеличению забора и потребления водных ресурсов электростанциями [23].

Увеличение количества рассматриваемых оптимизационных критериев, которые необходимо учитывать при проектировании структуры региональной энергетической системы (минимизация негативного воздействия на окружающую среду (в том числе с точки зрения климатических изменений), снижение стоимости производства энергии, максимизация полезного экономического и социального эффекта) послужило одной из основных причин все более широкого применения для решения таких задач непараметрического метода исследования операций – анализа среды функционирования (Data Envelopment Analysis, DEA).

Среди многочисленных подходов к моделированию энергетических и экологических проблем в зарубежной литературе анализ среды функционирования (АСФ) завоевал лидирующие позиции. Одна из причин – возможность проведения *сравнительного* моделирования эффективности функционирования различных секторов энергетики в разных странах, что стало

особенно актуально в связи с либерализацией энергетических рынков [25].

В настоящее время АСФ представляет собой развитую методологию оценки сравнительной эффективности функционирования множества однородных экономических, производственных или иных объектов с помощью различных моделей математического программирования. Объекты, эффективность которых оценивается в АСФ, обычно называются производственными единицами (ПЕ) или производственными объектами (ПО) и выполняют одну и ту же производственную функцию, преобразуя множество некоторых входов во множество некоторых выходов. Преимуществом АСФ является возможность работы с ПО в отсутствие каких-либо предположений о виде функциональной зависимости между входами и выходами. В российских работах АСФ применяется, в основном, для оценки эффективности деятельности бюджетной системы, региональных властей, банковских структур и т.д. [1–2], однако в последние годы появились работы по использованию АСФ в задачах оценки экологических аспектов деятельности хозяйствующих субъектов, в том числе объектов электроэнергетики [7].

В классической модели анализа среды функционирования, обозначаемой ССР (по первым буквам имен разработчиков – Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E. [10]) для каждого производственного объекта решается дробно-линейная задача математического программирования, где максимизируется отношение линейной комбинации взвешенных выходов к линейной комбинации взвешенных входов:

$$(1) \max_{u,v} h = \frac{\sum_i u_i y_{ij}}{\sum_k v_k x_{kj}}.$$

Данное отношение называется коэффициентом эффективности, его значения лежат в интервале от нуля до единицы. ПО, для которых коэффициент эффективности равен единице, признаются эффективными, а остальные – неэффективными. Если коэффициент эффективности задан в виде (1), то сама задача называется ориентированной по входам (input-oriented). Возможна и другая форма задания коэффициента эффективности:

как отношение линейной комбинации взвешенных входов к линейной комбинации взвешенных выходов. В этом случае задача будет называться ориентированной по выходам.

Расчет проекций неэффективных ПО в пространстве входов/выходов на границу эффективности позволяет определить целевые ориентиры по сокращению входов/увеличению выходов, достижение которых позволяет стать ПО эффективным.

Особенностью использования моделей АСФ для решения задач оптимизации энергетических систем является наличие так называемых нежелательных выходов, к которым относятся выбросы. Поэтому для решения экологических задач был разработан специальный класс моделей анализа среды функционирования, называемый моделями экологического АСФ (environmental DEA).

Целью настоящей работы является обзор методов и подходов, используемых для учета нежелательных выходов в моделях экологического АСФ, и разработка алгоритма применения базовой, ориентированной по входам модели анализа среды функционирования для проведения сравнительного анализа экологической эффективности крупных электрогенерирующих компаний России. Возможности разработанного двухэтапного алгоритма апробированы на данных по 24 производственным объектам на первом этапе и на детализированных данных 11 энергетических объектов, входящих в состав ОГК-2, на втором этапе.

## ***2. Модели анализа среды функционирования, используемые для решения задач оптимизации энергетической системы по экологическим критериям***

В коэффициентной форме классическая модель АСФ (ориентированная по входам ССR-модель) записывается следующим образом:

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

при ограничениях

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

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

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

где 0 – индекс ПО, для которого решается задача оптимизации;  $X$  – вектор входов размерности  $N$ ;  $Y$  – вектор выходов размерности  $M$ ;  $K$  – количество производственных объектов.

Или в двойственной форме:

$$(3) \quad \min_{\lambda} \theta$$

при ограничениях

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

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

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

В данной модели ищется возможность пропорционального сокращения входов без сокращения выходов. Множеством производственных возможностей модели CCR называется множество следующих наборов векторов  $(X, Y)$ :

$$(4) \quad T = \left\{ (X, Y) \left| \sum_{j=1}^n X_j \lambda_j \leq X, \quad \sum_{j=1}^n Y_j \lambda_j \geq Y, \quad \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n \right. \right\}.$$

В классических моделях АСФ, включая базовую модель CCR, входы и выходы предполагаются строго монотонными, т.е. множество производственных возможностей удовлетворяет следующему постулату:

$$(5) \quad \text{если } (X; Y) \in T \text{ и } X' \geq X \text{ или } Y' \leq Y, \\ \text{то } (X'; Y) \in T \text{ или } (X; Y') \in T.$$

Однако это свойство не всегда описывает реальную ситуацию производственного процесса. Например, генерация энергии электростанцией на углеводородном топливе всегда неизбежно связана с производством такого нежелательного выхода как

диоксид серы, и сокращение выхода без сокращения входа технологически невозможно. Поэтому использование множества производственных возможностей, удовлетворяющих постулату (5), приводит к некорректным результатам моделирования.

Обзор литературы позволяет сделать вывод о том, что к настоящему времени предпринято большое количество попыток учета нежелательных выходов в моделях АСФ, которые сформировались в два основных подхода: а) пересчет (модификация) исходных данных и использование традиционных моделей АСФ [20]; б) использование оригинальных исходных данных и моделей, основанных на концепции слабой монотонности [12–14].

При использовании первого подхода общую эффективность деятельности компании можно разделить на техническую (или экономическую), определяемую как отношение взвешенной суммы желательных выходов к взвешенной сумме входов, и экологическую, представляющую собой отношение взвешенных сумм желательных и нежелательных выходов.

Пусть из  $M$  выходов модели (2) первые  $k$  являются желательными, а остальные – нежелательными. Тогда экономическая мера эффективности ПО с индексом «0» может быть представлена в следующем виде:

$$(6) \quad h_{economy} = \frac{\sum_{r=1}^k \mu_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^M v_i x_{i0}},$$

а экологическая как

$$(7) \quad h_{ecology} = \frac{\sum_{r=1}^k \mu_r y_{r0}}{\sum_{s=k+1}^p \mu_s y_{s0}}.$$

Для того чтобы учесть обе меры эффективности в одной базовой модели ССР, необходимо сконструировать их некую комбинацию, отвечающую общей логике решения задачи – максимизации желательных входов и минимизации нежелательных выходов и входов. Следующий вариант

комбинированной меры эффективности вполне отвечает требуемым условиям (вариант А):

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

Кроме того, нежелательные выходы можно рассматривать наравне с входами модели, тогда мера эффективности примет следующий вид (вариант В):

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

В данном случае сокращение нежелательных выходов модели происходит одновременно с сокращением входов.

В работе [17] приводится доказательство того, что базовые модели ССР с мерой эффективности, сконструированной по варианту А, являются аналогичными моделям с мерой эффективности по варианту В.

Множество производственных возможностей, удовлетворяющее свойству слабой монотонности, определяется следующим образом:

$$(8) \quad T_e = \left\{ (X, Y, U) \mid \begin{array}{l} \sum_{k=1}^K z_k x_{nk} \leq x_n \quad n = 1, 2, \dots, N, \\ \sum_{k=1}^K z_k y_{mk} \geq y_m \quad m = 1, 2, \dots, M, \\ \sum_{k=1}^K z_k u_{jk} = u_j \quad j = 1, 2, \dots, J, \\ z_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, K; \end{array} \right\},$$

где  $U$  – вектор нежелательных выходов,  $e$  – индекс, обозначающий environmental (экологический), так как множества производственных возможностей такого вида используются в специальном направлении АСФ, называемом экологический АСФ.

Кроме того,  $T_e$  также удовлетворяет следующему свойству:

(9) если  $(X, Y, U) \in T$  и  $U = 0$ , то  $Y = 0$ .

Это означает, что полное элиминирование нежелательных выходов возможно только при прекращении производственного

процесса. Аналогичный подход может быть применен и для описания нежелательных входов. Модели со слабой монотонностью входов представлены в работах [13, 19].

Помимо свойства монотонности, операционные характеристики входов и выходов (шкалы, в которых измерены величины, представляющие входы и выходы) также могут быть отличительным признаком моделей экологического АСФ. В литературе часто упоминаются две модели [8–9], в которых входные и выходные переменные являются категориальными. Такие модели хорошо описывают производственные процессы в условиях введения определенного экологического законодательства, а также позволяют учесть влияние других внешних факторов, не подвластных контролю на самих производственных объектах.

Отдача от масштаба также является важным признаком множества производственных возможностей моделей АСФ. Базовая модель ССР является моделью с постоянной отдачей от масштаба. Если к свойствам множества  $T$  добавить условие

$$\sum_{i=1}^K \lambda_i = 1,$$

получим модель ВСС с переменной отдачей от масштаба (при увеличении масштабов производства эффект масштаба меняется от возрастания до убывания). Также весьма популярной в литературе является модель с невозрастающей отдачей от масштаба, которая характеризуется условием

$$\sum_{i=1}^K \lambda_i \leq 1.$$

Модели с переменной и невозрастающей отдачей от масштаба также могут быть не только строго монотонными, но и слабо монотонными.

Помимо ориентации меры эффективности (на входы, на выходы, на нежелательные выходы), важным свойством задач экологического АСФ является также способ сокращения входов (увеличения выходов), т.е. направление движения к границе эффективности.

Радиальная мера эффективности (или радиальный способ продвижения к границе эффективности) наиболее часто используется во всех моделях АСФ. В данном случае входы сокраща-

ются пропорционально на одно и то же число  $OC'/OC$  (движение по радиусу от исходной точки до границы эффективности) (рис. 1).

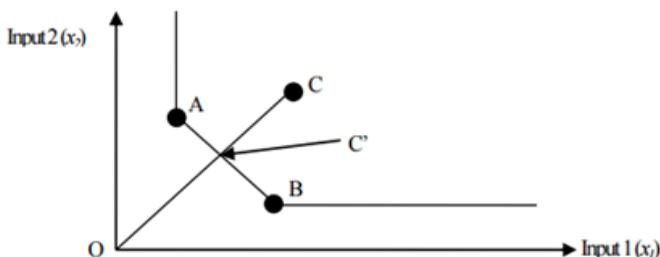


Рис. 1. Графическая иллюстрация радиальной меры эффективности в базовой модели CCR (двумерный случай)

Комбинируя радиальную меру эффективности с разными типами множества производственных возможностей, получим разные модели АСФ, в том числе и базовые CCR и ВСС. Так, в работах [12, 22–23] использовано множество производственных возможностей  $T_e$  и радиальная мера эффективности:

$$\min \theta : (X_0, Y_0, \theta U_0) \in T_e.$$

Не-радиальные меры эффективности позволяют сокращать входы/увеличивать выходы непропорционально и имеют обычно лучшую разрешающую способность, нежели радиальные меры. В литературе хорошо известна не-радиальная мера Рассела

$$\min \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \theta_n : (X_0 \theta, Y_0) \in T \right\},$$

где  $\theta$  – диагональная матрица, содержащая  $\theta_1, \dots, \theta_n$ .

В том случае, если  $\theta_1, \dots, \theta_n$  имеют разные веса, говорят об использовании взвешенной не-радиальной меры эффективности, которая отражает предпочтения лица, принимающего решения [24].

Гиперболическая мера эффективности, также называемая графической мерой, сокращает выходы и увеличивает входы одновременно на одну и ту же величину (движение к границе эффективности по гиперболе):

$$\left\{ \theta : (\theta X_0, Y_0 / \theta) \in T \right\}.$$

Эта мера считается наиболее удачной в том случае, когда имеются желательные и нежелательные выходы.

Направленная функция расстояния (Directional Distance Function, DDF) представляет собой меру эффективности, которая позволяет одновременно увеличивать желательные выходы и сокращать входы или нежелательные выходы при помощи вектора заданного направления. Она является обобщением традиционной радиальной меры эффективности [11].

### **3. Анализ сравнительной эффективности генерирующих компаний России по экологическим показателям**

Рассмотрим задачу оценки эффективности деятельности генерирующих компаний Российской Федерации по набору экологических параметров. Для расчета экологической эффективности (7) по базовой модели CCR, ориентированной по входам, с радиальной мерой эффективности используем последние доступные статистические данные [6] об экологических аспектах деятельности основных игроков на оптовом рынке электроэнергии и мощности – пяти генерирующих компаний оптового рынка электроэнергии (ОГК), которые объединяют крупнейшие тепловые электростанции России и нескольких территориальных генерирующих компаний (ТГК), которые объединяют электростанции нескольких соседних регионов, не вошедшие в ОГК и работающие в составе изолированных энергосистем (всего 24 объекта).

В качестве нежелательных выходов модели рассматриваются выбросы в атмосферу (тыс. т), объемы образования твердых отходов (тыс. т) и объемы потребления свежей воды для производственных и бытовых нужд компании (млн м<sup>3</sup>). В качестве желательных выходов рассматривается объем выработки электрической энергии.

Результаты расчетов, выполненных с помощью пакета прикладных программ MaxDEA, с использованием радиальной и не-радиальной мер эффективности представлены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты экологической эффективности деятельности генерирующих компаний в 2011 гг.

Название компании	Эффективность по радиальной мере	Эффективность по не-радиальной мере
ОГК-1	0,374	0,190
ОГК-2	0,168	0,115
ОГК-3	0,142	0,101
ОГК-4 ОАО «Э.ОН Россия»	0,611	0,543
ОГК-5 «Энел ОГК-5»	0,132	0,093
ТГК-1	0,300	0,265
ТГК-2	0,112	0,111
ОАО «Мосэнерго» (ТГК-3)	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>
ТГК-4 ОАО «Квадра»	0,558	0,477
ТГК-5	0,428	0,402
ТГК-6	0,591	0,412
ОАО «Волжская ТГК» (ТГК-7)	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>
ТГК-9	0,122	0,096
ОАО «Фортум» (ТГК-10)	0,366	0,299
ТГК-11	0,532	0,206
ОАО «Кузбассэнерго» (ТГК-12)	0,115	0,081
ОАО «Енисейская ТГК» (ТГК-13)	0,089	0,075
ТГК-14	0,717	0,457
Генерирующие компании «Лукойл»	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>
ОАО «Дальневосточная ГК»	0,177	0,091
ОАО «Иркутскэнерго»	0,528	0,284
ОАО «Татэнерго»	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>
ОАО «Башкирэнерго»	0,678	0,616
ОАО «СИБЭКО»	0,136	0,101

Интерпретация коэффициента эффективности ПО в данном случае следующая: он показывает отношение минимально возможных негативных экологических эффектов к реальным. Эффективными в данном случае являются те производственные объекты, которые используют наилучшие доступные технологии и наиболее чистое топливо с экологической точки зрения. Коэффициент эффективности таких ПО равен единице (выделены жирным шрифтом). Нетрудно заметить, что коэффициент эффективности неэффективных ПО, вычисленный радиальным способом, больше по значению, нежели коэффициент эффективности, вычисленные не-радиальным способом.

Целевые значения входных параметров (по 2011 году), которые необходимо достичь (по радиальному способу движения к границе эффективности) неэффективным компаниям для того, чтобы стать эффективными, приведены в таблице 2.

*Таблица 2. Значения целевых параметров по входам, достижение которых необходимо для в 2011 году*

Название компании	Целевые параметры		
	выбросы	отходы	потребление воды
ОГК-1	34,256	84,108	332,035
ОГК-2	63,444	155,770	614,933
ОГК-3	26,513	65,097	256,985
ОГК-4 ОАО «Э.ОН Россия»	55,864	147,106	412,725
ОГК-5 «Энел ОГК-5»	43,741	121,476	241,682
ТГК-1	16,385	29,442	158,045
ТГК-2	9,305	26,654	40,894
ТГК-4 ОАО «Квадра»	11,685	19,870	112,633
ТГК-5	10,929	31,453	46,131
ТГК-6	15,532	18,012	270,476
ТГК-9	14,927	42,799	65,070
ОАО «Фортум» (ТГК-10)	18,787	51,954	106,641
ТГК-11	9,231	26,567	38,964
ОАО «Кузбассэнерго»	19,991	52,513	149,342
ОАО «Енисейская ТГК»	11,266	31,170	63,775
ТГК-14	26,226	75,477	110,700

Название компании	Целевые параметры		
	выбросы	отходы	потребление воды
ОАО «Дальневосточная ГК»	23,341	67,172	98,520
ОАО «Иркутскэнерго»	63,063	181,488	266,183
ОАО «Башкирэнерго»	20,362	53,769	148,491
ОАО «СИБЭКО»	11,243	31,417	59,607

При достижении целевых ориентиров, представленных в таблице 2, каждая из анализируемых компаний может вплотную приблизиться в многомерном пространстве входов и выходов к своей эталонной точке, находящейся на границе эффективности.

Расчет целевых показателей, проведенный по не-радиальной мере эффективности, показал, что их значения меняются только для тех компаний, для которых существует не единственная эталонная точка (таблица 3).

*Таблица 3. Изменения целевых параметров в зависимости от способа продвижения к границе эффективности*

Название компании	Эталонные точки	$\Delta_{\text{выб}}$	$\Delta_{\text{отходы}}$	$\Delta_{\text{вода}}$
ОГК-4	«Мосэнерго»; «Татэнерго»	5,93	24,50	-71,27
ОГК-5	«Мосэнерго»; «Татэнерго»	-3,51	-14,52	42,22
ТГК-1	«Мосэнерго»; «Волжская ТГК»	3,39	-2,45	32,13
ТГК-2	«Мосэнерго»; «Татэнерго»	-0,10	-0,41	1,20
ТГК-4	«Мосэнерго»; «Волжская ТГК»	2,77	-2,01	26,27
ТГК-6	«Мосэнерго»; ГК Лукойл	6,25	-4,77	180,53
ТГК-9	«Мосэнерго»; «Татэнерго»	-0,13	-0,52	1,53
ТГК-10	«Мосэнерго»; «Татэнерго»	-1,68	-6,96	20,24
ТГК-12	«Мосэнерго»; «Татэнерго»	-4,00	-16,53	48,08

Название компании	Эталонные точки	$\Delta_{\text{выб}}$	$\Delta_{\text{отходы}}$	$\Delta_{\text{вода}}$
ТГК-13	«Мосэнерго»; «Татэнерго»	-0,99	-4,13	12,01
ОАО «Башкирэнерго»	«Мосэнерго»; «Татэнерго»	2,25	9,30	-27,05
ОАО «СИБЭКО»	«Мосэнерго»; «Татэнерго»	-0,75	-3,09	8,99

При продвижении к границе эффективности по не-радиальному пути некоторые целевые параметры могут увеличить свое значение по сравнению с радиальным способом (в этом случае в таблице разница указана со знаком «минус»), а некоторые – уменьшить (разница со знаком «плюс»). Какой из данных способов достижения эффективности лучше, зависит от затрат компании, которые необходимо произвести для достижения намеченных целевых показателей.

#### **4. Динамика экологической эффективности генерирующих компаний**

Рассмотрим вопрос о том, как меняется экологическая эффективность генерирующих компаний во времени. В таблице 4 приведены результаты расчетов коэффициентов эффективности генерирующих компаний за период 2009–2011 гг. по модели ССР, ориентированной по входам, с использованием радиальной меры эффективности.

*Таблица 4. Коэффициенты эффективности деятельности генерирующих компаний (по экологическим показателям) в 2009–2011 гг.*

Название компании	2009	2010	2011
ОГК-1	0,374	0,387	0,374
ОГК-2	0,173	0,165	0,168
ОГК-3	0,171	0,158	0,142
ОГК-4 ОАО «Э.ОН Россия»	0,624	0,577	0,611
ОГК-5 «Энел ОГК-5»	0,147	0,126	0,132
ТГК-1	0,534	0,378	0,300

Название компании	2009	2010	2011
ТГК-2	0,130	0,115	0,112
ОАО «Мосэнерго» (ТГК-3)	<b>1,000</b>	0,993	<b>1,000</b>
ТГК-4 ОАО «Квадра»	0,588	0,400	0,558
ТГК-5	0,505	0,464	0,428
ТГК-6	0,338	0,366	0,591
ОАО «Волжская ТГК» (ТГК-7)	0,731	0,627	<b>1,000</b>
ТГК-9	0,136	0,118	0,122
ОАО «Фортум» (ТГК-10)	0,438	0,308	0,366
ТГК-11	0,667	0,714	0,532
ОАО «Кузбассэнерго» (ТГК-12)	0,123	0,107	0,115
ОАО «Енисейская ТГК» (ТГК-13)	0,097	0,078	0,089
ТГК-14	0,099	0,079	0,717
Генерирующие компании Лукойл (до 2010 года ООО «ЮГК ТГК-8»)	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>
ОАО «Дальневосточная ГК»	0,208	0,189	0,177
ОАО «Иркутскэнерго»	0,719	0,597	0,528
ОАО «Татэнерго»	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>
ОАО «Башкирэнерго»	0,527	0,510	0,678
ОАО «СИБЭКО»	0,142	0,126	0,136

В 2009 и 2010 годах из всех анализируемых объектов только 3 компании – ОАО «Мосэнерго», Генерирующие компании группы «Лукойл» и ОАО «Татнефть» – были экологически эффективными. В 2011 году еще одна компания – ОАО «Волжская ТГК» стала эффективной. Однако судить о реальном изменении экологической эффективности только по значениям коэффициентов эффективности некорректно, в силу того, что от года к году может смещаться сама граница эффективности.

Для оценки изменения эффективности ПО во времени в задачах АСФ используется индекс производительности Малмквиста (Malmquist productivity index, MPI), который является непараметрическим методом анализа временных рядов [17]. В общем виде MPI определяется на основе функции расстояния, однако может также быть представлен как отношение мер эффективности.

Пусть  $\theta^t(X_0^t, Y_0^t)$  и  $\theta^{t+1}(X_0^t, Y_0^t)$  – ориентированные по входам меры эффективности  $ПО_0$ , рассчитанные по входам и выходам из решения задачи (3) в момент времени  $t$  на множестве производственных возможностей  $T$  в моменты времени  $t$  и  $t + 1$ . Пусть  $\theta^t(X_0^{t+1}, Y_0^{t+1})$  и  $\theta^{t+1}(X_0^{t+1}, Y_0^{t+1})$  – ориентированные по входам меры эффективности  $ПО_0$ , рассчитанные по входам и выходам из решения задачи (3) в момент времени  $t + 1$  на множестве производственных возможностей в моменты времени  $t$  и  $t + 1$ . Тогда ориентированный по выходам индекс производительности Малмквиста может быть представлен как

$$(9) \quad MPI_0 = \left[ \frac{\theta^t(X_0^{t+1}, Y_0^{t+1})}{\theta^t(X_0^t, Y_0^t)} \cdot \frac{\theta^{t+1}(X_0^{t+1}, Y_0^{t+1})}{\theta^{t+1}(X_0^t, Y_0^t)} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

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 [17].

Кроме того, в литературе часто используют следующую форму представления индекса Малмквиста:

$$(10) \quad MPI_0 = \left[ \frac{\theta^t(X_0^t, Y_0^t)}{\theta^{t+1}(X_0^t, Y_0^t)} \cdot \frac{\theta^t(X_0^{t+1}, Y_0^{t+1})}{\theta^{t+1}(X_0^{t+1}, Y_0^{t+1})} \right]^{\frac{1}{2}} \times \frac{\theta^{t+1}(X_0^{t+1}, Y_0^{t+1})}{\theta^t(X_0^t, Y_0^t)}.$$

В форме (10) 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).

Результаты расчетов индексов Малмквиста приведены в таблице 5.

Таблица 5. Значения индекса Малмквиста (ориентированного по выходу) в период 2009-2010 и 2010-2011

Название компании	MPI 2009–2010	MPI 2010–2011
ОГК-1	0,9522	0,9426
ОГК-2	0,8574	0,9784
ОГК-3	0,9522	0,9426
ОГК-4 ОАО «Э.ОН Россия»	0,6700	<b>1,0242</b>

Название компании	MPI 2009–2010	MPI 2010–2011
ОГК-5 «Энел ОГК-5»	0,8805	<b>1,0170</b>
ТГК-1	0,5365	0,6175
ТГК-2	0,8805	0,9484
ОАО «Мосэнерго» (ТГК-3)	0,9723	0,9865
ТГК-4 ОАО «Квадра»	0,6705	<b>1,3079</b>
ТГК-5	0,8805	0,9200
ТГК-6	0,8469	<b>1,2539</b>
ОАО «Волжская ТГК» (ТГК-7)	0,7708	<b>1,2641</b>
ТГК-9	0,8805	0,9520
ОАО «Фортум» (ТГК-10)	0,8891	<b>1,1160</b>
ТГК-11	0,8805	0,9200
ОАО «Кузбассэнерго» (ТГК-12)	0,8556	<b>1,0659</b>
ОАО «Енисейская ТГК» (ТГК-13)	0,8157	<b>1,1212</b>
ТГК-14	0,8805	<b>1,2143</b>
Генерирующие компании Лукойл	<b>1,0171</b>	<b>1,0569</b>
ОАО «Дальневосточная ГК»	0,8805	0,9200
ОАО «Иркутскэнерго»	0,8805	0,9200
ОАО «Татэнерго»	0,9383	1,0000
ОАО «Башкирэнерго»	0,7630	<b>1,3424</b>
ОАО «СИБЭКО»	0,8550	<b>1,0862</b>

Таким образом, реальная экологическая эффективность увеличилась в период 2009–2010 гг. только у генерирующих компаний группы «Лукойл», в то время как у остальных компаний она снизилась. В период 2010–2011 гг. уже 12 компаний увеличили свою экологическую эффективность (значение индекса Малкмвиста выделены жирным шрифтом).

### **5. Формирование оптимальной стратегии экологического менеджмента генерирующей компании**

До настоящего момента все выполненные нами расчеты касались только экологической эффективности изучаемых ПО, в то время как экономические параметры их деятельности не

рассматривались. Включение в рассмотрение экономических параметров возможно благодаря способам, подробно описанным в п. 2. Однако, по нашему мнению, для решения задачи формирования оптимальной стратегии инвестиций генерирующих компаний, направленных на природоохранную деятельность, возможно использование более простого подхода, а именно решение задачи в два этапа.

На первом этапе решается задача оценки экологической эффективности деятельности компании и расчета целевых значений по основным экологическим показателям в случае, если компания оказалась неэффективной. На втором этапе для каждого неэффективного производственного объекта строится еще одна модель АСФ, в которой входами являются экономические параметры проектов (стоимость, срок реализации и др.) по сокращению негативных экологических эффектов до уровня, рассчитанного в качестве целевого ориентира (или близкого к нему) на предыдущем этапе. Решение данной модели помогает выбрать проекты, наиболее эффективные с точки зрения инвестиционных вложений и достижения позитивных экологических результатов.

Последовательно детализируя данные по электростанциям, входящих в ведение каждой ОГК и ТГК, получим решение задачи об оптимизации развития энергетической системы в целом.

Рассмотрим задачу оценки эффективности деятельности отдельных производственных объектов (электростанций) в составе оптовой генерирующей компании ОГК-2 (признана неэффективной по данным 2011 года). Результаты расчета модели ССР по входным параметрам, выполненные в пакете прикладных программ MaxDEA (радиальный способ движения к границе эффективности) на данных 2013 года (официальный отчет о деятельности компании в 2013 году, <http://www.ogk2.ru/>) приведены в таблице 6.

Из результатов расчетов, представленных в таблице 2, можно сделать вывод о том, что эффективными по экологическим показателям деятельности являются три электростанции компании ОГК-2 – Адлерская ТЭС, Киришская ГРЭС и Сургутская ГРЭС-1. На всех этих электростанциях в

качестве основного топлива используется газ, однако Псковская и Ставропольская ГРЭС также работают на газе и, тем не менее, не являются эффективными объектами, поэтому вид топлива не является единственным объясняющим фактором экологической эффективности или неэффективности.

Таблица 6. Результаты расчета экологической эффективности деятельности электростанции компании ОГК-2 по экологическим показателям (по модели ССР)

Электростанция	Коэфф. эф-ти	Целевые показатели по входам		
		Выбросы, тыс. т	Отходы, тыс. т	Вода, млн м <sup>3</sup>
Адлерская ТЭС	1	743,25	3,09	642,33
Киришская ГРЭС	1	2415,57	3,40	574645,2
Красноярская ГРЭС-2	0,066	1572,01	1,26	34978,45
Новочеркасская ГРЭС	0,057	3262,63	2,57	52722,81
Псковская ГРЭС	0,876	488,38	0,69	116182,1
Рязанская ГРЭС	0,422	3507,38	14,60	3031,13
Серовская ГРЭС	0,039	645,04	0,49	3281,98
Ставропольская ГРЭС	0,744	2489,71	3,51	592281,4
Сургутская ГРЭС-1	1	7432,52	5,57	21622,2
Троицкая ГРЭС	0,237	1818,42	7,57	1571,507
Череповецкая ГРЭС	0,041	932,33	0,72	11876,88

Содержательно наиболее «близким» статистическим показателем, используемым в практике энергоменеджмента генерирующих компании, к рассчитанному коэффициенту эффективности является показатель удельного расхода условного топлива на отпуск электроэнергии, который характеризует экономичность различных генерирующих установок (коэффициент линейной корреляции Пирсона, рассчитанный по данным электростанций, входящих в состав ОГК-2, равен  $-0,81$ ).

Улучшение экологических показателей деятельности компаний возможно благодаря реализации следующих проектов, не связанных со сменой топлива или технологией генерации энергии [3–4, 5–6]:

1) по уменьшению выбросов в атмосферу: внедрение малотоксичных горелок при сжигании высококонцентрированной пыли для снижения окислов азота, установка (или ремонт) аспирационных установок, электрофильтров, золоулавливателей;

2) по снижению потребления воды и сбора сточных вод: очистка и отведение минерализованных сточных вод, установка (или ремонт) очистных сооружений производственных и поверхностных стоков, введение в эксплуатацию нефтесборщиков;

3) по снижению объемов образования отходов: утилизация (переработка и использование) золошлаков, разработка технологий, повышающих надежность хранения золошлаков;

4) по общему повышению экологической эффективности: внедрение систем экологического менеджмента по ИСО 14001 (в настоящее время внедрена на Ставропольской, Псковской, Сургутской, Серовской и Троицкой ГРЭС), снижение удельных расходов условного топлива на отпуск электроэнергии.

Кроме того, необходимо также рассматривать существующие технико-технологические возможности по замене топлива на более экологически чистое и переход на принципиально иные технологии генерации энергии (инновационные варианты развития). Наименее затратный вариант на настоящий момент предусматривает использование природного газа для выработки электроэнергии, к наиболее затратным российские специалисты относят промышленное освоение технологий ветровой энергетики и фотовольтаики [6]. В пределах средних затрат находятся атомная энергетика и технология «чистого угля», минимизирующая выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

Стоимостные и временные показатели каждого из вышеперечисленных проектов (а также некоторые показатели социальной эффективности) могут быть использованы как входные параметры для ССР модели АСФ следующего уровня, решение которой позволяет оптимизировать экономические (и

социальные) параметры инвестиционных проектов, направленных на снижение негативного воздействия на окружающую среду каждой из неэффективных электростанций. Выходами модели в данном случае являются целевые показатели экологических эффектов, рассчитанные на предыдущем этапе. Обобщенный алгоритм построения модели представлен на рис. 2

Расчет иллюстративного примера в данном случае не представляется возможным в силу отсутствия в открытом доступе необходимых статистических данных об экономических показателях инвестиционных проектов, направленных на снижение негативного воздействия на окружающую среду.

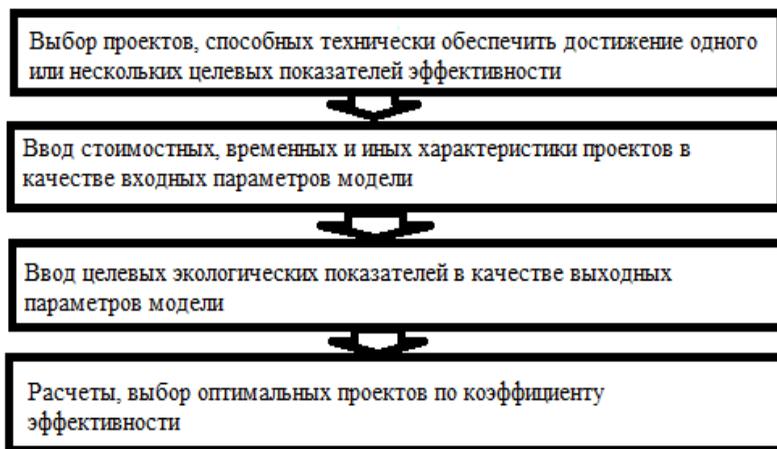


Рис. 2. Алгоритм построение модели АСФ второго уровня

## 6. Заключение

Основным результатом настоящего исследования является доказательство возможности использования базовой модели анализа среды функционирования (модели ССР, ориентированной по входам) для решения задачи выбора оптимальной стратегии экологического менеджмента генерирующей компании.

Следует заметить, что каждая из рассмотренных крупных генерирующих компаний состоит из нескольких производственных единиц – электростанций, работающих на разном оборудовании и по разным технологиям генерации электроэнергии. Поэтому используемые для расчетов статистические данные являются усредненными, а полученные результаты расчета экологической эффективности не отражают полной картины, по которой можно было бы судить о качестве экологического менеджмента на исследуемых предприятиях. Тем не менее, полученные результаты могут быть использованы при оценке степени выполнения и степени целесообразности инвестиционных программ генерирующих компаний с точки зрения экологических проблем, разработке государственных программ поддержки модернизационных процессов в электроэнергетике, экологических стандартов и программ по энергосбережению.

Разработанный метод включает последовательное решение нескольких моделей АСФ: на первом этапе определяются эффективные и неэффективные с точки зрения экологии энергетические объекты, для неэффективных объектов рассчитываются целевые параметры снижения негативных экологических эффектов. На втором этапе по каждому неэффективному энергетическому объекту решается своя задача оптимизации (используется модель CRR, ориентированная по входу), в которой в качестве входов рассматриваются экономические и социальные характеристики проектов, направленных на снижение негативных экологических эффектов, а в качестве выходов указываются рассчитанные на первом этапе значения целевых показателей негативных экологических эффектов.

Помимо радиального способа продвижения к границе эффективности при расчете целевых показателей, для каждого из изучаемых ПО возможно также использование иных способов продвижения к границе, в частности не-радиального. Выбор способа продвижения к границе в данном случае определяется стоимостными характеристиками проектов, направленных на достижение целевых экологических показателей и может быть однозначно определен только на этапе решения задачи АСФ второго уровня (определении экономической эффективности). Кроме стоимостных характеристик выбор способа продвижения

к границе эффективности может быть также определен из соотношений важности того или иного экологического эффекта для конкретного региона или территории.

Наряду с исследованиями сравнительной эффективности ПО в один и тот же момент времени, в эколого-ориентированных исследованиях часто возникает необходимость оценки изменения эффективности ПО во времени. Для этих целей используется индекс производительности Малмквиста (Malmquist productivity index, MPI), который является непараметрическим методом анализа временных рядов, позволяющим исследовать изменение сравнительной эффективности ПО во времени с помощью решения задач АСФ.

### **Литература**

1. ПИСКУНОВ А.А., ИВАНЮК И.И., ДАНИЛИНА Е.П. и др. *Система рейтингования регионов с использованием методологии АСФ* // Вестник АКСОР. – 2008. – №4. – С. 24–30.
2. ПИСКУНОВ А.А., ИВАНЮК И.И., ЛЫЧЕВ А.В. и др. *Использование методологии АСФ для оценки эффективности расходования бюджетных средств на государственное управление в субъектах Российской Федерации* // Вестник АКСОР. – 2009. – №2. – С. 28–36.
3. РАТНЕР С.В., АЛМАСТЯН Н.А. *Экологический менеджмент в Российской Федерации: проблемы и перспективы развития* // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2014. – №17. – С. 37–45.
4. РАТНЕР С.В., АЛМАСТЯН Н.А. *Рыночные и административные методы регулирования негативным воздействием объектов электроэнергетики на окружающую среду* // Экономический анализ: теория и практика. – 2015. – №16. – С. 2–15.
5. ФАДЕЕВА А.В. *Противоречия в эколого-экономической системе современного российского общества как фактор активизации инвестиций в человеческий капитал* // Экономические науки. – 2007. – №2(27). – С. 203–204.

6. *Функционирование и развитие электроэнергетики в 2011 году*. – Информационно-аналитический доклад. – Минэнерго РФ, 2012. – 383 с.
7. ХРУСТАЛЕВ Е.Ю., ПАТНЕР П.Д. *Анализ экологической эффективности электроэнергетических компаний России на основе методологии анализа среды функционирования // Экономический анализ: теория и практика*. – 2015. – №35. – С. 33–42.
8. BANKER R.D., MOREY R.C. *The use of categorical variables in data envelopment analysis // Management Science*. – 1986. – No. 32. – P. 1613–1627.
9. BANKER R.D., MOREY R.C. *Efficiency analysis for exogenously fixed inputs and outputs // Operations Research*. – 1986. – No. 34. – P. 513–521.
10. COOPER W.W., SEIFORD L.M., TONE T. *Introduction to Data Envelopment Analysis and Its Uses: With DEA-Solver Software and References*. – Springer, New York. 2006. – 388 p.
11. CHUNG Y.H., FARE R., GROSSKOPF S. *Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach // Journal of Environmental Management*. – 1997. – No. 51. – P. 229–240.
12. FARE R., GROSSKOPF S., PASURKA JR. etc. *Accounting for air pollution emissions in measures of state manufacturing productivity growth // Journal of Regional Science*. – 2001. – No. 41. – P. 381–409.
13. FARE R., GROSSKOPF S., LOVELL C.A.K. *Production frontiers*. – Cambridge University Press, Cambridge, 1994 – 312 p.
14. FARE R., GROSSKOPF S., HERNANDEZ-SANCHO F. *Environmental performance: An index number approach // Resource and Energy Economics*. – 2004. – No. 26. – P. 343–352.
15. *Global Wind 2006 Report*. – GWEC, Brussels, Belgium, 2007. – 60 p.
16. HAN L. *The brief and wondrous life of solar energy development // The New Presence*, April, 2015. – [Электронный ресурс] – URL: <http://www.pritomnost.cz/en/economics> (дата обращения: 18.03.2016).
17. KORHONEN P.J., LUPTACIK M. *Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis // Eu-*

- ropean Journal of Operational Research. – 2004. – No. 154. – P. 437–446.
18. LO K. *A Critical review of China rapidly developing renewable energy and energy policies* // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – No. 29. – P. 508–516.
  19. OUDE LANSINK A., BEZLEPKIN I. *The effect of heating technologies on CO2 and energy efficiency of Dutch greenhouse firms* // Journal of Environmental Management. – 2003. – No. 68. – P. 73–82.
  20. SEIFORD L.M., ZHU J. *Modelling undesirable factors in efficiency evaluation* // European Journal of Operational Research. – 2002. – No. 142. – P. 16–20.
  21. TYTECA D. *On the measurement of the environmental performance of firms – a literature review and a productive efficiency perspective* // Journal of Environmental Management. – 1996. – No. 46. – P. 281–308.
  22. TYTECA D. *Linear programming models for the measurement of environmental performance of firms – concepts and empirical results* // Journal of Productivity Analysis. – 1997. – No. 8. – P. 183–197.
  23. *Water for Energy: Is energy becoming a thirstier resource? World Energy Outlook 2012. Special Topics.* – OECD/IEA, Paris, 2012. – 31 p.
  24. ZHU J. *Data envelopment analysis with preference structure* // Journal of the Operational Research Society. – 1996. – No. 47. – P. 136–150.
  25. ZHOU P., ANG B.W., POH K.L. *A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies* // European Journal of Operational Research. – 2008. – No. 189. – P. 1–18.

## **ELABORATION OF ECOLOGY MANAGEMENT STRATEGY OF POWER GENERATING COMPANIES BASED ON DATA ENVELOPMENT ANALYSIS**

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

**Pavel Ratner**, Plekhanov Russian University of Economics, Krasnodar, Russian Federation, student (ratner.p.d@gmail.com).

*Abstract: This paper demonstrates a possibility of a CCR Data Envelopment Analysis (DEA) model to be applied to elaboration of ecology management strategies in power generating companies. The literature review of data envelopment analysis in environmental and energy studies is provided. The methods of including undesirable outputs in the model are analyzed. The two-stage algorithm of construction of a DEA-model with undesirable outputs is presented. The DEA-model is applied to statistical data for main Russian electric power generation companies. The scores of ecological efficiency are calculated and possible practical implementations of the results are discussed.*

**Key words:** data envelopment analysis, non-parametric optimization, ecological effects, electricity generation.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В.В. Клочковым.*

*Поступила в редакцию 07.08.2015.*

*Опубликована 31.03.2016.*