

К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ С УЧЕТОМ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ*Светлана Валерьевна РАТНЕР^{а*}, Валерий Викторович ИОСИФОВ^б

^а доктор экономических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экономической динамики и управления инновациями, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация
lanaratner@ipu.ru

^б кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машиностроения и автомобильного транспорта, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Российская Федерация
iosifov_v@mail.ru

• Ответственный автор

История статьи:

Получена 27.07.2017

Получена в доработанном

виде 07.08.2017

Одобрена 16.08.2017

Доступна онлайн 29.08.2017

УДК 004.94:620.9

JEL: O18, O33, Q42

Ключевые слова:

анализ жизненного цикла, экологические эффекты, солнечная энергетика, государственное стимулирование, анализ среды функционирования

Аннотация

Предмет. Достиженные за последние годы в России темпы развития производственной базы для солнечной энергетики позволяют говорить о создании в стране полноценной технологической цепочки, способной удовлетворить растущий спрос внутреннего рынка и в перспективе обеспечить выход на международные рынки фотовольтаики.

Цели. Оценка негативного воздействия различных промышленно освоенных технологий фотовольтаики на окружающую среду в целях выбора и поддержки наиболее экологичных видов производств, стандартизации и идентификации наилучших доступных технологий.

Методология. Оценка негативного воздействия конкурирующих технологий фотовольтаики на окружающую среду проводилась по методологии анализа жизненного цикла продукции. Категории и количественно измеряемые показатели воздействия были выбраны в соответствии с методикой CML 2001. Информационной основой исследования послужила база данных EcoInvent, являющаяся в настоящее время ведущим агрегатором первичных данных об экологических эффектах жизненного цикла более чем 12 тыс. видов продукции. Сравнительная оценка комплексной экологической эффективности конкурирующих технологий фотовольтаики проводилась с использованием моделей анализа среды функционирования.

Результаты. Выявлено, что наибольшей комплексной экологической эффективностью на протяжении всего жизненного цикла обладают фотоэлектрические панели на тонкопленочных фотоэлементах на основе теллурида кадмия и селенида меди-индия. Экономические показатели, определяющие предпочтительность той или иной технологии при одинаковом уровне экологичности, могут быть рассчитаны с помощью стандартных процедур технико-экономического анализа. Для остальных технологий фотовольтаики рассчитаны целевые значения пятнадцати показателей негативного воздействия на окружающую среду, реализация которых позволяет достичь этим технологиям экологической эффективности.

Выводы. Полученные результаты могут использоваться для разработки и коррекции государственных программ стимулирования развития солнечной энергетики в России.

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2017

Для цитирования: Ратнер С.В., Иосифов В.В. К вопросу о разработке стратегии развития солнечной энергетики в России с учетом экологических эффектов // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2017. – Т. 16, № 8. – С. 1522 – 1540.

<https://doi.org/10.24891/ea.16.8.1522>

В последние годы во многих странах мира стоимость электрической энергии, полученной с помощью фотогальванических установок различных типов, практически сравнялась

со стоимостью электроэнергии, произведенной традиционными способами (на тепловых газовых и угольных установках), а в отдельных случаях стала даже ниже¹ [1]. Это объясняется существенным падением

* Исследование выполнено при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований, проект №16-06-00147_а «Разработка моделей анализа среды функционирования для оптимизации траекторий развития региональных экономических систем по экологическим параметрам».

¹ Global Market Outlook for Solar Power 2016–2020. Solar Power Europe, Brussels, Belgium, 2016, 40 p.
URL: http://www.solareb2b.it/wp-content/uploads/2016/06/SPE_GMO2016_full_version.pdf

цен на фотоэлектрические панели и модули, достигнутым благодаря наращиванию мировых объемов производства данных видов продукции и непрерывному совершенствованию технологий солнечной энергетики (рис. 1, 2).

В России доля солнечной энергетики в общем объеме установленных мощностей пока очень мала, однако развитие отрасли идет быстрыми темпами (рис. 3).

Как позитивный момент можно отметить и тот факт, что благодаря государственной программе поддержки возобновляемой энергетики, в последние годы в стране полностью сформировалась производственная база, начались разработка и освоение отечественных инновационных технологий производства солнечных элементов. В апреле 2017 г. действующая производственная линия Новочебоксарского завода (Чувашская Республика) по изготовлению фотоэлектрических модулей компании «Хевел» была конвертирована под производство гетероструктурных солнечных модулей нового поколения с коэффициентом преобразования энергии 22%, а годовой объем выпуска продукции в настоящее время составляет 160 МВт.

Достигнутые показатели в производственной сфере и в сфере исследований и разработок позволяют прогнозировать дальнейшее развитие производства фотоэлектрических модулей в России как для нужд быстро растущего внутреннего рынка, так и для выхода на международные рынки.

В настоящее время промышленно освоенными в мире являются несколько технологий фотовольтаики. Это монокристаллические кремниевые, поликристаллические кремниевые и тонкопленочные (рис. 4).

До недавнего времени выбор между освоением той или иной технологии осуществлялся преимущественно по двум

параметрам – стоимость и эффективность (коэффициент полезного действия или коэффициент преобразования энергии).

Однако с ростом производственных мощностей по всему миру все большую значимость при выборе той или иной технологии солнечной энергетики должны приобретать экологические аспекты, такие как выбросы загрязняющих веществ производственными объектами в воздух, воду и почву, потребление редкоземельных металлов, воды, энергии и т.д.

Несмотря на то, что на стадии эксплуатации солнечные панели всех типов практически не оказывают негативного воздействия на окружающую среду (за исключением возможного нерационального использования почвенных ресурсов), их производство и утилизация связаны со значительным энергопотреблением, использованием рабочих жидкостей, содержащих хлораты и нитриты, образованием токсичных сточных вод и т.д.

Поэтому долгосрочные программы развития солнечной энергетики, особенно поддерживаемые государством, должны учитывать потенциальное негативное воздействие развивающихся производств на окружающую среду и отдавать предпочтение развитию тех технологий, которые при прочих равных параметрах позволяют свести его к минимуму.

В связи с этим исследования, направленные на оценку негативных экологических эффектов солнечной энергетики по методике анализа и оценки жизненного цикла (Life Cycle Analysis) в соответствии с требованиями международного стандарта ISO 14040-14042² являются актуальными и востребованными практикой.

² Соответствуют российским стандартам ГОСТ Р ИСО 14040–2010 «Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура»; ГОСТ Р ИСО 14041–2000 «Управление окружающей средой. Оценка жизненного цикла. Определение цели, области исследования и инвентаризационный анализ»; ГОСТ Р ИСО 14042–2001 «Управление окружающей средой. Оценка жизненного цикла. Оценка воздействия жизненного цикла».

Целью нашего исследования является сравнительная оценка комплексной экологической эффективности современных технологий фотовольтаики по наиболее значимым категориям воздействия на окружающую среду в соответствии с методологией анализа и оценки жизненного цикла продукции и услуг. Информационной базой исследования послужили данные, представленные в агрегаторе EcoInvent (некоммерческая ассоциация исследователей организаций Швейцарии³).

В настоящее время EcoInvent является ведущей в мире базой по оценке жизненного цикла в соответствии со стандартами ISO 14040-14043 и содержит наборы данных по жизненному циклу более чем 12 800 продуктов и услуг.

Для оценки комплексной эффективности различных технологий использован метод анализа среды функционирования (Data Envelopment Analysis), позволяющий решать задачи многокритериальной непараметрической оптимизации для множества однородных производственных объектов, обладающих одинаковыми наборами входных и выходных показателей функционирования.

Методология анализа и оценки жизненного цикла продукции предполагает идентификацию, измерение и агрегацию всех негативных воздействий процессов производства (включая все переделы), транспортировки, эксплуатации и утилизации продукции, начиная, как правило, от этапов добычи исходного сырья (рис. 5).

При этом под негативными воздействиями понимаются не только выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, воду и

³ В настоящее время в ассоциацию EcoInvent входят Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Федеральная политехническая школа Лозанны, Институт Пауля Шеррера, Швейцарская федеральная лаборатория материаловедения и технологий, Швейцарский федеральный исследовательский центр в области сельскохозяйственных наук Agroscope.
URL: <http://www.ecoinvent.org>

почву, но также и потребление невозобновляемых и редких природных ресурсов.

Основная трудность исследований, проводимых по методологии анализа жизненного цикла, заключается в идентификации границ жизненного цикла некоторых видов продукции и в необходимости гармонизации первичных данных, полученных по видам производств.

В случае возобновляемой энергетики производственная система достаточно хорошо идентифицируема, так как границы жизненного цикла определяются сравнительно легко, однако вторая трудность – гармонизация первичных данных – усугубляется «молодостью» производственных технологий, их быстрым совершенствованием и существенной зависимостью объемов производства конечной продукции (электроэнергии) от географического расположения генерирующих установок [2, 3]. Поэтому проблема сопоставимости исходных данных и приведения их к одним единицам измерения является в данном случае основной.

Для ее преодоления нами были использованы данные по жизненному циклу генерирующих объектов солнечной энергетики одной и той же мощности (3 кВт), произведенных и установленных на одной и той же географической территории (Швейцария) с единым уровнем среднегодовой инсоляции.

Все исходные наборы данных приведены к 1 кВт·ч произведенной и переданной в единую сеть электроэнергии.

Оценка негативных экологических эффектов фотовольтаических установок в базе данных EcoInvent возможна по нескольким методикам, различающимся между собой по охвату спектра воздействий на окружающую среду, длительности этого воздействия (в течение 10, 20, 100 или более лет), уровню научного обоснования эффектов воздействия (признан всем научным сообществом, признан

большинством научного сообщества, имеются отдельные результаты исследований) и т.д.

Одним из наиболее простых способов подсчета негативных экологических эффектов является простое суммирование выбросов в окружающую среду и потребления из окружающей среды различных химических элементов (например, алюминия, магния, железа и др.) и их устойчивых соединений (кислород, углерод, вода и др.).

Однако результаты оценки жизненного цикла, полученные таким способом, нуждаются в дополнительном анализе и интерпретации, которая под силу лишь высококвалифицированным специалистам в области экологии. Поэтому нами для оценки негативных экологических эффектов была выбрана одна из наиболее популярных методик CML 2001 [4–6], согласно которой в качестве измеряемых эффектов рассматриваются следующие обобщенные категории воздействия на окружающую среду:

- окисление;
- воздействие на климат;
- эвтрофикация⁴;
- экотоксичность пресной воды;
- экотоксичность пресноводного осадка;
- экотоксичность для человека;
- ионизирующее излучение;
- землепользование;
- зловоние;
- экотоксичность морской воды;
- экотоксичность морского осадка;
- фотохимическое окисление;

⁴ Процесс ухудшения качества воды из-за избыточного поступления в водоем соединений азота и фосфора, что вызывает гибель флоры и фауны водоема, образование в донном грунте метана и сероводорода.

- деградация абиотических ресурсов;
- стратосферное истончение озонового слоя;
- наземная экотоксичность.

Длительность воздействия выбрана – 100 лет, уровень научного обоснования – наивысший.

Единицы измерения данных негативных экологических эффектов (категорий воздействия) и их подробное описание представлены в *табл. 1*.

Сравнение оценок негативных экологических эффектов различных технологий фотовольтаики можно проводить отдельно по каждой из категорий воздействия, указанных в *табл. 1*, однако при этом получение однозначного вывода о предпочтительности той или иной технологии с экологической точки зрения является затруднительным, так как одна и та же технология может превосходить все остальные по одной категории воздействия, но уступать другим технологиям по другим категориям.

При попытке оценить комплексную экологическую эффективность мы сталкиваемся с проблемой агрегирования всех разнородных показателей негативных экологических эффектов и расчета некоего интегрального индекса с учетом значимости различных категорий негативного воздействия солнечной энергетики на окружающую среду.

В случае, если значимость всех категорий известна, то данная проблема легко решается с помощью хорошо известного и активно применяемого в различных областях знания метода весовых коэффициентов.

В том же случае, когда значимость различных частных показателей оценить не представляется возможным, процедура «свертки» может быть осуществлена непараметрическими методами, в частности, методом анализа среды функционирования.

В настоящее время анализ среды функционирования активно используется для оценки сравнительной эффективности хозяйственной деятельности множества однородных (производящих одни и те же виды продукции и потребляющих одни и те же виды ресурсов) экономических, производственных или иных объектов [7–10].

Анализ среды функционирования позволяет выделить объекты (в принятой терминологии – производственных объектов), деятельность которых может быть признана эффективной, а для неэффективных объектов – найти наилучший путь приближения к границе эффективности.

В последние годы в зарубежной и российской научной литературе возрос интерес к экологическому анализу среды функционирования – модифицированному методу анализа среды функционирования, который позволяет оценить сравнительную эффективность деятельности экономических агентов, производящих одни и те же виды продукции и нежелательные экологические эффекты, но потребляющие в общем случае различные виды ресурсов [11–14].

Экологический анализ среды функционирования позволяет выделить экономических агентов, которые производят максимальные объемы полезной продукции при минимальном негативном воздействии на окружающую среду, что позволяет значительно усовершенствовать стратегии экологического менеджмента, идентифицировать наилучшие доступные технологии [15], оценить уровень развития экоинноваций на предприятиях и т.д.

Математический аппарат анализа среды функционирования подробно описан в работах [16, 17], существенные отличия экологического анализа среды функционирования от базовой методологии изложены в работах [18–20].

Используем ориентированную по входам (input-oriented) базовую модель анализа среды функционирования с постоянным эффектом масштаба для расчета коэффициентов экологической эффективности следующих конкурирующих в настоящее время технологий фотовольтаики:

- монокристаллические кремниевые элементы (single-Si);
- поликристаллические кремниевые элементы (multi-Si);
- фотоэлементы из аморфного кремния (a-Si);
- фотоэлементы из ленточного кремния (ribbon-Si);
- тонкопленочные фотоэлементы, элементы на основе теллурида кадмия (CdTe);
- тонкопленочные фотоэлементы на основе селенида меди–индия (CIS).

Так как объем произведенной за весь жизненный цикл продукции солнечных батарей (электроэнергии) зависит не только от технологии производства фотоэлементов, но и от способа инсталляции, будем рассматривать для каждой из перечисленных технологий все возможные виды установок: инсталляция на плоской (flat-roof) или наклонной крыше (slanted-roof), фасаде здания (facade), отдельной конструкцией (mounted) или интеграцией в конструктивные элементы здания (integrated), в виде панели (panel) или ламината (laminated).

С учетом указанных ограничений по мощности и географической локализации солнечных батарей из доступных наборов данных, содержащихся в EcoInvent, были выбраны наборы данных для 16 объектов. Глубина каждого набора данных (период наблюдения за генерирующим объектом) составляет 12 лет (с 2005 по 2016 г. включительно).

В качестве входов модели рассматриваются количественно измеренные негативные

экологические эффекты по категориям, указанным в *табл. 1* (всего 15 показателей). В качестве выхода модели рассматривается 1 кВт·ч произведенной электроэнергии. В результате расчетов, проведенных в специализированном пакете прикладных программ открытого доступа MaxDEA, получены значения коэффициентов комплексной экологической эффективности для каждого генерирующего объекта, представленные в *табл. 2*.

Как видно из результатов расчетов, представленных в *табл. 2*, наиболее эффективными с экологической точки зрения на протяжении всего жизненного цикла являются тонкопленочные фотоэлементы на основе теллурида кадмия, селенида меди-индия, аморфного и ленточного кремния, установленные в наклонном положении⁵.

При этом фотоэлементы на основе теллурида кадмия и селенида меди-индия являются эффективными вне зависимости от вида инсталляции, в то время как для аморфного и ленточного кремния наибольшую эффективность обеспечивает интеграция в конструктивные элементы здания (наклонную крышу) и ламинирование.

Дальнейший выбор между данными технологиями, демонстрирующими равнозначную экологическую эффективность, может быть осуществлен с помощью традиционных инструментов технико-экономического анализа.

Помимо данного основного вывода, который может быть использован при разработке стратегии развития солнечной энергетики в России и отечественных производств солнечных фотоэлементов,

решение задачи анализа среды функционирования позволяет также получить целевые значения по каждому из показателей негативного воздействия на окружающую среду каждой из неэффективных технологий, достижение которых выводит технологию на границу эффективности. Значения целевых показателей представлены по каждой из неэффективных технологий в *табл. 3, 4*.

Знание целевых параметров, которых необходимо достичь каждой из технологий фотовольтаики чтобы стать эффективной в экологическом плане, может значительно упростить процесс управления прикладными научными исследованиями, направленными на совершенствование данных технологий, а также на разработку инновационных технологий фотовольтаики на органическом сырье.

Таким образом, в результате проведенного исследования получено несколько результатов прикладного характера, которые могут быть использованы для разработки и коррекции государственных и отраслевых программ долгосрочного развития фотовольтаики в России в условиях постоянно ужесточающихся требований природоохранного законодательства.

Кроме того, в методологическом плане самостоятельную ценность может представлять алгоритм использования базовых моделей анализа среды функционирования как составного элемента расширенного технико-экономического анализа, применяемого в целях проектирования инновационной продукции с учетом требований по экологичности.

⁵ При инсталляции под углом, равном или близком к географической широте места локализации генерирующего объекта, достигается максимальный уровень инсоляции, обеспечивающий его максимальную производительность.

Таблица 1

Категории негативного воздействия на окружающую среду согласно методике CML-2001, показатели и единицы их измерения

Table 1

Categories of negative ecologic effects under the CML-2001 method, indicators, and units of measurement

Категория	Показатель	Описание
Окисление	Универсальный потенциал окисления (единый для всех регионов мира), кг SO ₂ , экв./кг	Основными химическими окислителями являются SO ₂ , NO _x , HCl и NH ₃ . Кислые газы реагируют с водой в атмосфере и тем самым образуется «кислотный дождь». Повышение потенциала окисления наблюдается при сжигании топлива для производства энергии. Потенциал окисления измеряется как сумма водородных ионов, произведенных на кг вещества, связанного с SO ₂
Эвтрофикация	Потенциал ухудшения качества воды в открытых водоемах, кг PO ₄ , экв./кг	Эвтрофикация включает в себя потенциальные воздействия высокого содержания в окружающей среде макроэлементов, наиболее важные из которых – азот и фосфор. Повышение содержания питательных веществ может вызвать нежелательное изменение в составе видов и повышение биомассы как в водной, так и наземных экосистемах
Стратосферное истончение озонового слоя	Потенциал истончения озонового слоя, кг CFC-11, экв./кг	При сокращении озонового слоя более высокий объем ультрафиолетового облучения проникает к поверхности Земли, что отрицательно влияет на биосферу. Главные факторы истончения озонового слоя – это вещества, содержащие хлор и бром. Все они связаны с представительным веществом для этой категории – трихлорфторметаном CFC-11
Изменение климата	Потенциал глобального потепления, кг CO ₂ , экв./кг	Считается, что выбросы некоторых видов газов (углекислый газ CO ₂ , метан CH ₄ , закись азота N ₂ O, фторированные газы) вызывают парниковый эффект, приводящий к изменению климата, опустыниванию земель, повышению уровня мирового океана, распространению болезней. В качестве эталонного газа взят диоксид углерода
Экотоксичность	Токсичность для человека, пресноводная экотоксичность воды и осадка, морская экотоксичность воды и осадка, кг 1,4-DCB/кг	Наиболее токсичными веществами являются тяжелые металлы (шестивалентный хром, ртуть, свинец, никель, медь, диоксины, барий и сурьма). Воздействие всех элементов пересчитывается на эквивалент дихлорбензола 1,4-DCB, который оказывает губительное воздействие на здоровье человека, животных и растения
Ионизирующее излучение	Радиация, DALYs	Включает воздействие рентгена, альфа-, бета- и гамма-частиц. Ионизирующее излучение представляется в DALYs (сокращение продолжительности жизни). Определяется, как разность прожитых лет и потерянных жизненных лет от эффекта атомной радиации
Землепользование	Площадь занятой земли, м ² /год	Потеря биоразнообразия от сокращения доступных земельных ресурсов

Источник: [3, 4, 6]

Source: [3, 4, 6]

Таблица 2

Значения комплексной экологической эффективности конкурирующих технологий фотовольтаики при различных способах установки генерирующего объекта

Table 2

Values of complex ecologic efficiency of rival PV technologies with different methods of generating facility installation

Характеристика генерирующего объекта	Коэффициент эффективности
CdTe, slanted-roof, laminated	1
CIS, slanted-roof, panel, mounted	1
single-Si, laminated, facade, integrated	0,652
multi-Si, panel, facade, mounted	0,614
multi-Si, laminated, facade, integrated	0,667
single-Si, panel, facade, mounted	0,602
multi-Si, flat-roof, mounted	0,93
single-Si, flat-roof, mounted	0,919
a-Si, laminated, integrated, slanted-roof	1
a-Si, panel, mounted, slanted-roof	0,877
multi-Si, laminated, integrated, slanted-roof	0,996
multi-Si, panel, mounted, slanted-roof	0,806
multi-Si, panel, mounted, label-certified, slanted-roof	0,906
ribbon-Si, laminated, integrated, slanted-roof	1
ribbon-Si, panel, mounted, slanted-roof	0,925
single-Si, laminated, integrated, slanted-roof	0,98

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Таблица 3

Значения целевых показателей негативного воздействия на окружающую среду кремниевых фотоэлектрических элементов (по всем этапам жизненного цикла)

Table 3

Target values of negative ecologic effect for silicone-based PV elements (at all stages of their life cycle)

Целевые показатели негативного воздействия	Характеристика технологии					
	single-Si, laminated, facade, integrated	multi-Si, panel, facade, mounted	multi-Si, laminated, facade, integrated	single-Si, panel, facade, mounted	multi-Si, flat-roof, mounted	single-Si, flat-roof, mounted
Окисление, кг SO ₂ , экв./кг	0,000498	0,000495	0,0005	0,000501	0,000497	0,000502
Климатические изменения, кг CO ₂ , экв./кг	0,069283	0,068985	0,069871	0,070373	0,069357	0,070594
Эвтрофикация, кг PO ₄ , экв./кг	0,00026	0,000255	0,00026	0,000267	0,000256	0,000267
Пресноводная экотоксичность воды, 1,4-DCB экв.	0,180949	0,181495	0,18089	0,184326	0,181295	0,183939
Пресноводная экотоксичность осадка, кг 1,4-DCB/кг	0,422224	0,423888	0,422135	0,429811	0,423321	0,428966
Экотоксичность для человека, кг C ₆ H ₄ Cl ₂ л экв.	0,115556	0,119253	0,114938	0,116588	0,117796	0,116128
Ионизирующее излучение, DALY·10 ⁻⁶	0,000133	0,000131	0,000134	0,000136	0,000132	0,000136
Использование земли, м ²	0,005467	0,005222	0,005517	0,005434	0,005323	0,005466
Зловоние, м ³	701,9843	638,0728	713,1113	680,7116	663,4739	689,2738
Экотоксичность морской воды, 1,4-DCB экв.	0,608027	0,608973	0,607909	0,618457	0,608619	0,617298
Экотоксичность морского осадка, 1,4-DCB экв.	0,754995	0,756466	0,754958	0,767205	0,755985	0,765906
Фотохимическое окисление, C ₂ H ₄ экв.·10 ⁻³	0,025985	0,026233	0,026067	0,026224	0,026194	0,026246
Ухудшение абиотических ресурсов, кг Sb экв.	0,000464	0,000464	0,000468	0,00047	0,000466	0,000472
Истончение озонового слоя, CFC-11 экв.·10 ⁻⁶	0,012583	0,011043	0,012856	0,01174	0,011657	0,011983
Наземная экотоксичность, 1,4-DCB экв.	0,000033	0,000032	0,000033	0,000033	0,000032	0,000033

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Таблица 4

Значения целевых показателей негативного воздействия на окружающую среду тонкопленочных фотоэлектрических элементов (по всем этапам жизненного цикла)

Table 4

Target values of negative ecologic effect for thin-film PV elements (at all stages of their life cycle)

Целевые показатели негативного воздействия	Характеристика технологии					
	a-Si, panel, mounted, slanted-roof	multi-Si, laminated, integrated, slanted-roof	multi-Si, panel, mounted, slanted-roof	multi-Si, panel, mounted, label-certified, slanted-roof	ribbon-Si, panel, mounted, slanted-roof	single-Si, laminated, integrated, slanted-roof
Окисление, кг SO ₂ , экв./кг	0,877272	0,995734	0,806213	0,905801	0,924974	0,980025
Климатические изменения, кг CO ₂ , экв./кг	0,000462	0,0005	0,000494	0,000494	0,000488	0,000501
Эвтрофикация, кг PO ₄ , экв./кг	0,060388	0,070079	0,068828	0,068829	0,066823	0,070266
Пресноводная экотоксичность воды, 1,4-DCB экв.	0,000239	0,00026	0,000254	0,000254	0,000254	0,000262
Пресноводная экотоксичность осадка, кг 1,4-DCB/кг	0,183751	0,180869	0,181579	0,181579	0,181713	0,181592
Экотоксичность для человека, кг C ₆ H ₄ Cl ₂ л экв.	0,429551	0,422103	0,424127	0,424125	0,424217	0,423725
Ионизирующее излучение, DALY·10 ⁻⁶	0,137388	0,114719	0,119868	0,119865	0,121523	0,114986
Использование земли, м ²	0,000116	0,000134	0,00013	0,00013	0,000128	0,000135
Зловоние, м ³	0,003899	0,005535	0,00518	0,00518	0,005038	0,005524
Экотоксичность морской воды, 1,4-DCB экв.	318,702	717,0388	627,36	627,4129	597,1961	711,6637
Экотоксичность морского осадка, 1,4-DCB экв.	0,613081	0,607867	0,609122	0,609121	0,609406	0,610097
Фотохимическое окисление, C ₂ H ₄ экв.·10 ⁻³	0,760907	0,754945	0,756668	0,756667	0,7566	0,757548
Ухудшение абиотических ресурсов, кг Sb экв.	0,025813	0,026096	0,02625	0,02625	0,025931	0,026141
Истончение озонового слоя, CFC-11 экв.·10 ⁻⁶	0,000411	0,000469	0,000463	0,000463	0,000449	0,00047
Наземная экотоксичность, 1,4-DCB экв.	0,003284	0,012953	0,010784	0,010785	0,010041	0,012752

Источник: авторская разработка

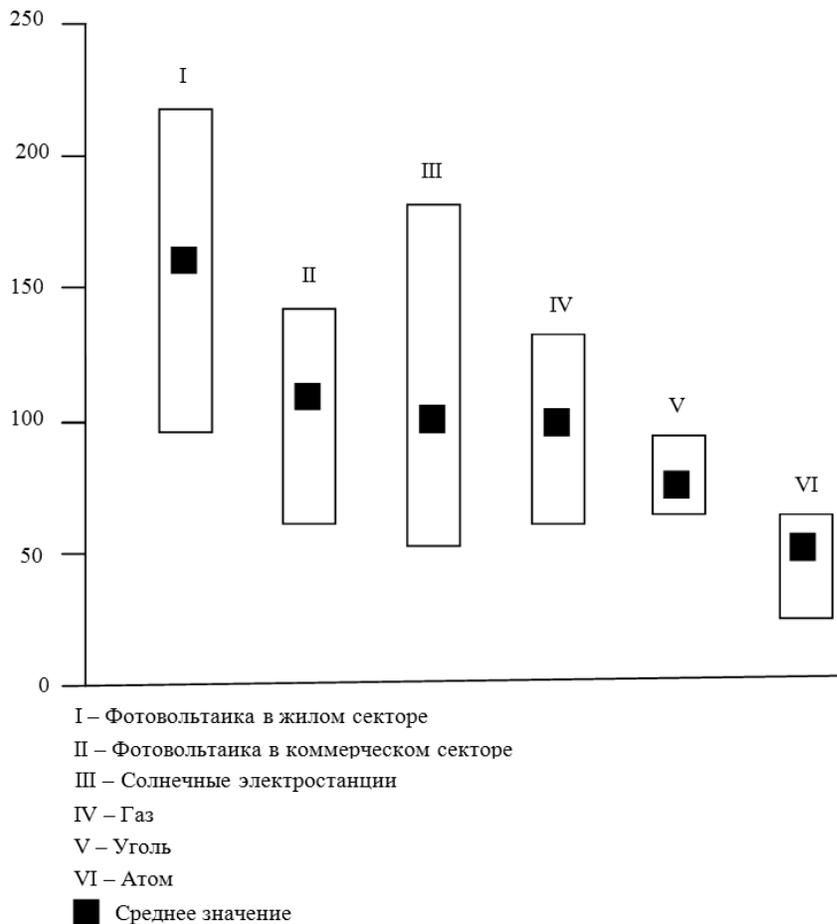
Source: Authoring

Рисунок 1

Приведенная стоимость энергии различных видов генерации, долл. США/МВт

Figure 1

Present value of energy generated under various technologies, USD/MW



Источник: Global Market Outlook for Solar Power 2016–2020. Solar Power Europe, Brussels, Belgium, 2016, 40 p.
 URL: http://www.solareb2b.it/wp-content/uploads/2016/06/SPE_GMO2016_full_version.pdf

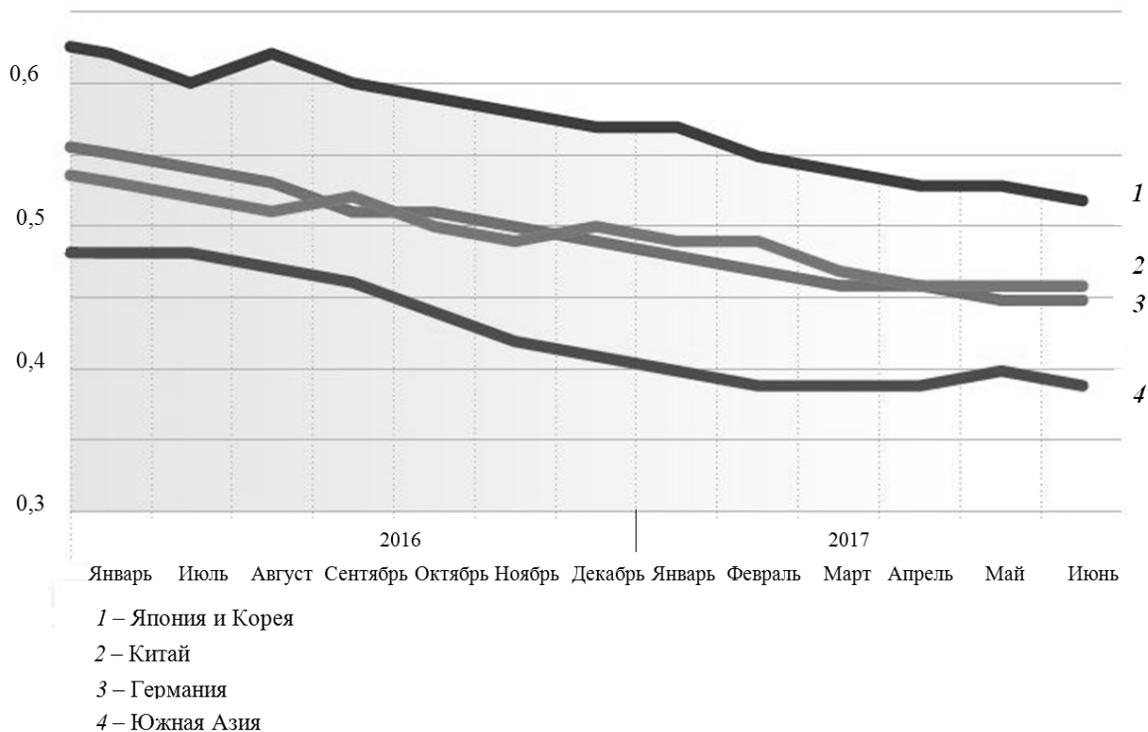
Source: Global Market Outlook for Solar Power 2016–2020. Solar Power Europe, Brussels, Belgium, 2016, 40 p.
 URL: http://www.solareb2b.it/wp-content/uploads/2016/06/SPE_GMO2016_full_version.pdf

Рисунок 2

Стоимость фотоэлектрических модулей в различных регионах мира (2016, 2017 гг.), евро/Вт

Figure 2

Cost of PV modules in various regions of the world (2016, 2017), EUR/W



Источник: составлено авторами по данным pvXchange your PV marketplace. URL: www.pvXchange.com

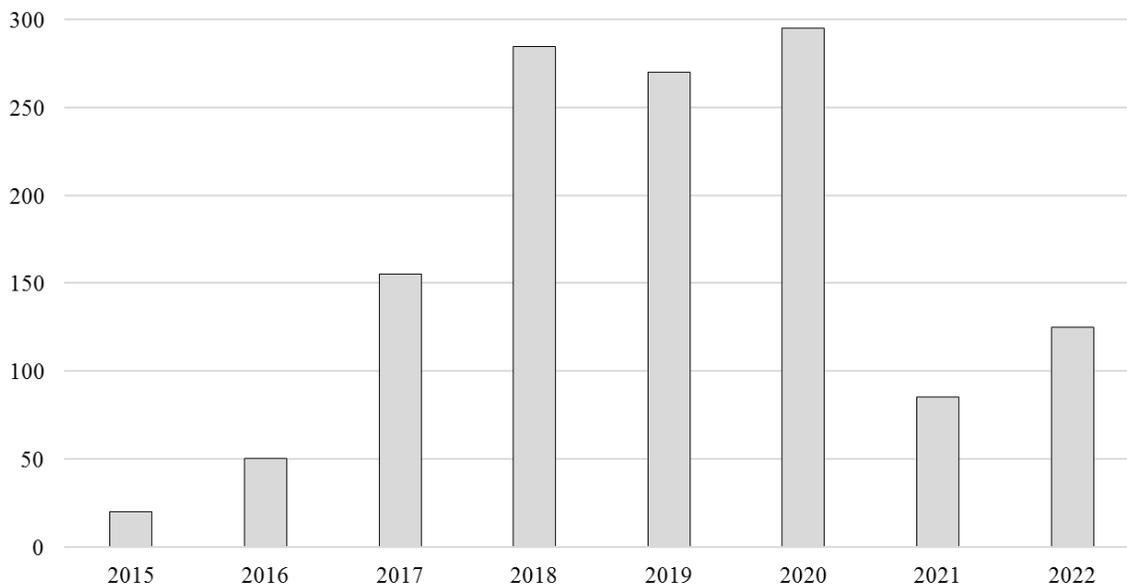
Source: Authoring, based on pvXchange marketplace data. URL: www.pvXchange.com

Рисунок 3

Динамика ввода солнечных мощностей на оптовом рынке (реальная и планируемая до 2022 г.) по программе поддержки возобновляемой энергетики в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 28.05.2013 № 499 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности (вместе с Правилами определения цены на мощность генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии)», МВт

Figure 3

Trends in solar capacity commissioning in the wholesale market (real and estimated up to 2022) under the program for renewable energy support within the framework of the RF Government Resolution of May 28, 2013 № 499 *On Mechanism to promote the use of renewable energy in the wholesale electricity and capacity market (together with Rules for pricing the capacity of renewable energy generating facilities, MW*



Источник: авторская разработка

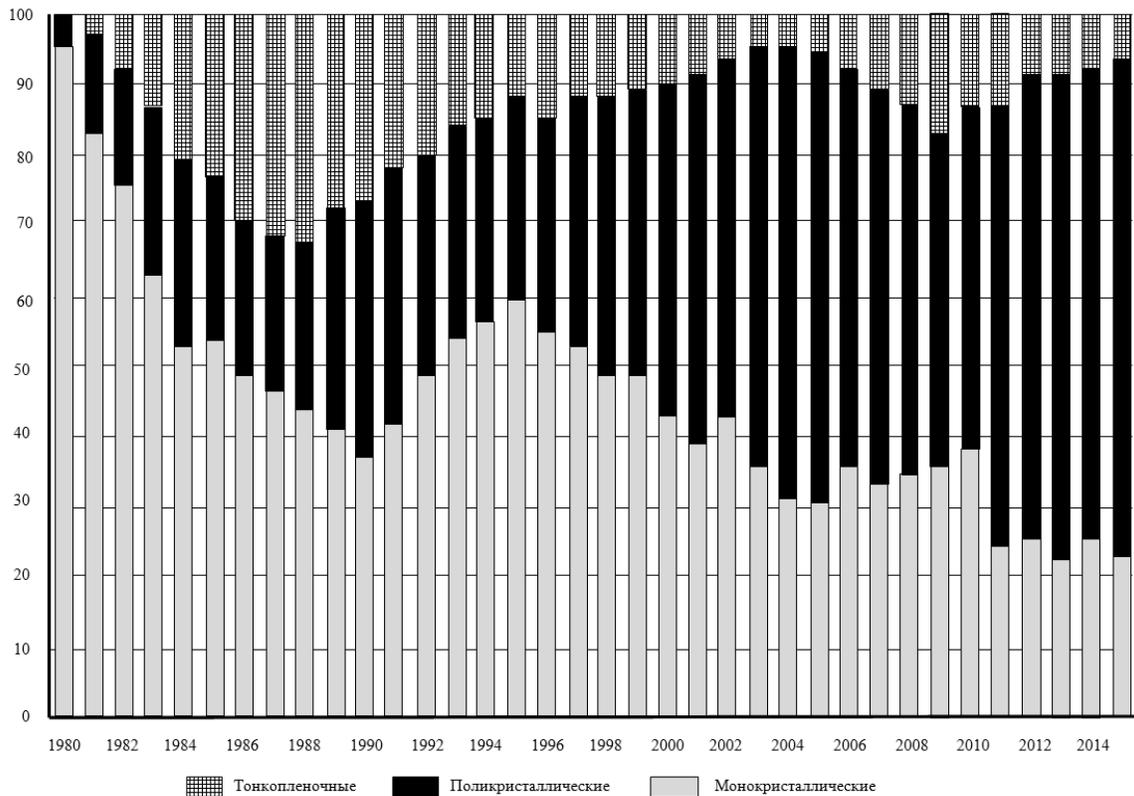
Source: Authoring

Рисунок 4

Структура мирового производства солнечных фотоэлементов в 1980–2015 гг., %

Figure 4

The structure of solar cell world production in 1980–2015, percentage



Источник: Photovoltaics Report: ISE with support of PSE AG. Freiburg, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2016.
 URL: www.ise.fraunhofer.de

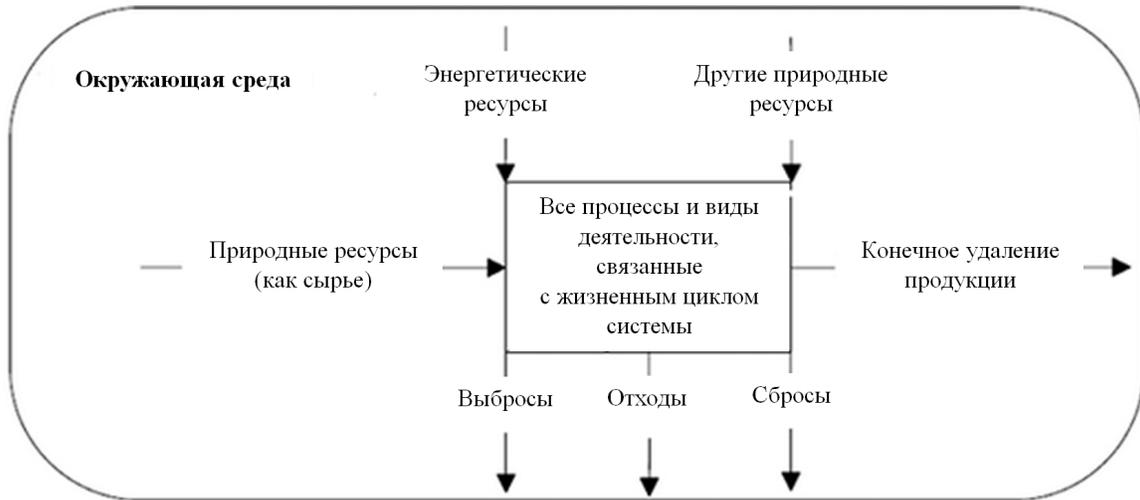
Source: Photovoltaics Report: ISE with support of PSE AG. Freiburg, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2016.
 URL: www.ise.fraunhofer.de

Рисунок 5

Схема оценки жизненного цикла продукции

Figure 5

Product life cycle evaluation scheme



Источник: [1]

Source: [1]

Список литературы

1. *Budavari Z., Szalay Z.* Indicators and weighting systems, including normalisation of environmental profiles. URL: http://www.sintef.no/globalassets/project/lore-lca/deliverables/lore-lca-wp5-d5.1-emi_final.pdf
2. *Hong J., Chen W., Qi C. et al.* Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China. *Solar Energy*, 2016, vol. 133, pp. 283–293. doi: 10.1016/j.solener.2016.04.013
3. *Akinyele D.O., Rayudu R.K., Nair N.K.C.* Life cycle impact assessment of photovoltaic power generation from crystalline silicon-based solar modules in Nigeria. *Renewable Energy*, 2017, vol. 101, pp. 537–549. doi: 10.1016/j.renene.2016.09.017
4. *Monteiro H., Freire F.* Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods. *Energy and Buildings*, 2012, vol. 47, pp. 572–583. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.12.032
5. *Badyda K., Krawczyk P., Pikoń K.* Relative environmental footprint of waste-based fuel burned in a power boiler in the context of end-of-waste criteria assigned to the fuel. *Energy*, 2016, vol. 100, pp. 425–430. doi: 10.1016/j.energy.2016.02.024
6. *Тулохонова А.В., Уланова О.В.* Оценка жизненного цикла интегрированных систем управления отходами: монография. Иркутск: Иркутский гос. технический университет, 2014. 191 с.
7. *Пискунов А.А., Иванюк И.И., Данилина Е.П. и др.* Система рейтингования регионов с использованием методологии АСФ // Вестник АКСОП. 2008. № 4. С. 24–30.
8. *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.
9. *Мельников Р.М.* Развитие методологии оценки эффективности научно-инновационных программ с учетом зарубежного опыта // Инновации. 2016. № 10. С. 65–73.
10. *Земцов С.П., Бабурин В.Л.* Как оценить эффективность региональных инновационных систем в России? // Инновации. 2017. № 2. С. 60–66.
11. *Seiford L.M., Zhu J.* Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. *European Journal of Operational Research*, 2002, vol. 142, iss. 1, pp. 16–20.
12. *Chung Y.H., Färe R., Grosskopf S.* Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, 1997, vol. 51, iss. 3, pp. 229–240.
13. *Färe R., Grosskopf S., Pasurka Jr.C.A.* Accounting for air pollution emissions in measures of state manufacturing productivity growth. *Journal of Regional Science*, 2001, no. 41, iss. 3, pp. 381–409.
14. *Färe R., Grosskopf S., Hernandez-Sancho F.* Environmental performance: An index number approach. *Resource and Energy Economics*, 2004, vol. 26, iss. 4, pp. 343–352.
15. *Веселова К.А.* Наилучшие доступные технологии: реализация комплексного подхода // Экология производства. 2010. № 12. С. 88–90.

16. *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.
17. *Cook W.D., Seiford L.M.* Data Envelopment Analysis (DEA) – Thirty years on. *European Journal of Operational Research*, 2009, vol. 192, iss. 1, pp. 1–17.
doi: 10.1016/j.ejor.2008.01.032
18. *Wang Ke, Wei Yiming, Zhang Xian.* A comparative analysis of China's regional energy and emission performance: Which is a better way to deal with undesirable outputs. *Energy Policy*, 2012, vol. 46, pp. 574–584. doi: 10.1016/j.enpol.2012.04.038
19. *Ратнер С.В., Ратнер П.Д.* Моделирование структуры региональной энергетической системы с использованием методологии анализа среды функционирования // *Russian Journal of Management*. 2015. Т. 3. № 2. С. 159–166.
20. *Хрусталёв Е.Ю., Ратнер П.Д.* Эко-инновации в электроэнергетике: оценка сравнительной эффективности // *Инновации*. 2015. № 9. С. 86–92.

Информация о конфликте интересов

Мы, авторы данной статьи, со всей ответственностью заявляем о частичном и полном отсутствии фактического или потенциального конфликта интересов с какой бы то ни было третьей стороной, который может возникнуть вследствие публикации данной статьи. Настоящее заявление относится к проведению научной работы, сбору и обработке данных, написанию и подготовке статьи, принятию решения о публикации рукописи.

**STRATEGIZING FOR SOLAR ENERGY DEVELOPMENT IN RUSSIA
SUBJECT TO ENVIRONMENTAL IMPACT**Svetlana V. RATNER^{a,*}, Valerii V. IOSIFOV^b^a V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
lanaratner@ipu.ru^b Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation
iosifov_v@mail.ru

* Corresponding author

Article history:Received 27 July 2017
Received in revised form
7 August 2017
Accepted 16 August 2017
Available online
29 August 2017**JEL classification:** O18, O33,
Q42**Keywords:** Life Cycle Analysis,
LCA, ecological effect, solar
energy, Data Envelopment
Analysis**Abstract****Subject** The article considers the issues of production base development for solar energy in Russia and process chain creation, which can meet the growing demand of the domestic market and, in the long run, approach international photovoltaics markets.**Objectives** The purpose of the study is to assess negative impact of various photovoltaic (PV) technologies on environment to select and support the most ecologically friendly production, standardize and identify the best available technologies.**Methods** We assess the negative impact of rival PV technologies on environment, using the Life Cycle Analysis technique. Based on the CML 2001 methodology, we select the categories and quantifiable indicators of the impact. Comparative evaluation of integrated eco-efficiency of rival PV technologies was carried out using the Data Envelopment Analysis.**Results** We found that cadmium telluride and copper indium selenide photovoltaic panels on film solar cells are the most ecologically efficient throughout the life cycle. Economic indicators that determine the preference of one or another technology at the same level of environmental friendliness can be derived from standard procedures for techno-economic analysis. For the rest of the PV technologies, we calculated target values of fifteen indicators of negative environmental impact, which, if achieved, provide for their eco-efficiency.**Conclusions** The findings can be applied to design and amend State programs for solar energy development in Russia.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2017

Please cite this article as: Ratner S.V., Iosifov V.V. Strategizing for Solar Energy Development in Russia Subject to Environmental Impact. *Economic Analysis: Theory and Practice*, 2017, vol. 16, iss. 8, pp. 1522–1540.
<https://doi.org/10.24891/ea.16.8.1522>**Acknowledgments**The article was supported by Russian Foundation for Basic Research under project No. 16-06-00147_a *Building Models for Operational Environment Analysis to Streamline the Development of Regional Economic Systems Based on Ecological Parameters*.**References**

1. Budavari Z., Szalay Z. Indicators and weighting systems, including normalisation of environmental profiles. URL: http://www.sintef.no/globalassets/project/lore-lca/deliverables/lore-lca-wp5-d5.1-emi_final.pdf
2. Hong J., Chen W., Qi C. et al. Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China. *Solar Energy*, 2016, vol. 133, pp. 283–293.
doi: 10.1016/j.solener.2016.04.013
3. Akinyele D.O., Rayudu R.K., Nair N.K.C. Life cycle impact assessment of photovoltaic power generation from crystalline silicon-based solar modules in Nigeria. *Renewable Energy*, 2017, vol. 101, pp. 537–549. doi: 10.1016/j.renene.2016.09.017

4. Monteiro H., Freire F. Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods. *Energy and Buildings*, 2012, vol. 47, pp. 572–583. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.12.032
5. Badyda K., Krawczyk P., Pikoń K. Relative environmental footprint of waste-based fuel burned in a power boiler in the context of end-of-waste criteria assigned to the fuel. *Energy*, 2016, vol. 100, pp. 425–430. doi: 10.1016/j.energy.2016.02.024
6. Tulokhonova A.V., Ulanova O.V. *Otsenka zhiznennogo tsikla integrirovannykh sistem upravleniya otkhodami* [Life Cycle Analysis of integrated systems of waste management]. Irkutsk, ISTU Publ., 2014, 191 p.
7. Piskunov A.A., Ivanyuk I.I., Danilina E.P., Lychev A.V., Krivonozhko V.E. [A system to rate regions using the DEA methodology]. *Vestnik AKSOR = AKSOR Bulletin*, 2008, no. 4, pp. 24–30. (In Russ.)
8. Krivonozhko V.E., Safin M.M., Utkin O.B., Lychev A.V. [The EffiVision software solution to analyze the operation of complex systems]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Information Technology and Computer Systems*, 2005, no. 3, pp. 85–95. (In Russ.)
9. Mel'nikov R.M. [Developing a methodology for assessing the efficiency of scientific and innovative programs based on foreign experience]. *Innovatsii = Innovations*, 2016, no. 10, pp. 65–73. (In Russ.)
10. Zemtsov S.P., Baburin V.L. [How to evaluate the efficiency of regional innovation systems in Russia?]. *Innovatsii = Innovations*, 2017, no. 2, pp. 60–66. (In Russ.)
11. Seiford L.M., Zhu J. Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. *European Journal of Operational Research*, 2002, vol. 142, iss. 1, pp. 16–20.
12. Chung Y.H., Färe R., Grosskopf S. Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, 1997, vol. 51, iss. 3, pp. 229–240.
13. Färe R., Grosskopf S., Pasurka C.A.Jr. Accounting for air pollution emissions in measures of State manufacturing productivity growth. *Journal of Regional Science*, 2001, no. 41, iss. 3, pp. 381–409.
14. Färe R., Grosskopf S., Hernandez-Sancho F. Environmental performance: An index number approach. *Resource and Energy Economics*, 2004, vol. 26, iss. 4, pp. 343–352.
15. Veselova K.A. [The best available technologies: Implementing a complex approach]. *Ekologiya proizvodstva = The Ecology of Production*, 2010, no. 12, pp. 88–90. (In Russ.)
16. Cooper W.W., Seiford L.M., Tone T. *Introduction to Data Envelopment Analysis and Its Uses: With DEA-Solver Software and References*. New York, Springer, 2006.
17. Cook W.D., Seiford L.M. Data Envelopment Analysis (DEA) – Thirty years on. *European Journal of Operational Research*, 2009, vol. 192, iss. 1, pp. 1–17. doi: 10.1016/j.ejor.2008.01.032
18. Wang Ke, Wei Yiming, Zhang Xian. A comparative analysis of China's regional energy and emission performance: Which is a better way to deal with undesirable outputs? *Energy Policy*, 2012, vol. 46, pp. 574–584. doi: 10.1016/j.enpol.2012.04.038

19. Ratner S.V., Ratner P.D. [Design of the structure of regional energy system based on data envelopment model]. *Russian Journal of Management*, 2015, vol. 3, no. 2, pp. 159–166. (In Russ.)
20. Khrustalev E. Yu., Ratner P.D. [Selecting an optimal strategy for conversion of the regional energy system to low-carbon technologies]. *Innovatsii = Innovations*, 2015, no. 9, pp. 86–92. (In Russ.)

Conflict-of-interest notification

We, the authors of this article, bindingly and explicitly declare of the partial and total lack of actual or potential conflict of interest with any other third party whatsoever, which may arise as a result of the publication of this article. This statement relates to the study, data collection and interpretation, writing and preparation of the article, and the decision to submit the manuscript for publication.