

С.В. Ратнер, д-р экон. наук, доцент,  
г. Москва,

В.В. Иосифов, канд. техн. наук, доцент,<sup>1</sup>  
г. Краснодар

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ: СТОИМОСТНОЙ АНАЛИЗ<sup>2</sup>**

Успешная реализация целей по развитию возобновляемой энергетики, заявленных в Энергетической стратегии России на период до 2030 г., невозможна без понимания качественных особенностей динамики основных экономических параметров производства возобновляемой энергии из различных источников. В настоящей работе на основе обширного эмпирического материала проведен анализ динамики капитальных затрат «солнечных» проектов различной мощности, построены уравнения, описывающие ожидаемую динамику роста рентабельности технологий солнечной энергетики в России. Проведена линейная суперпозиция нескольких автокорреляционных моделей, каждая из которых отвечает за изменение отдельных компонент капитальных затрат и стоимости эксплуатации энергообъектов под влиянием эффектов обучения и экономии от масштаба.

**Ключевые слова:** возобновляемая энергетика, солнечная энергетика, стоимостной анализ, эффект обучения, эффект масштаба, прогнозирование, модели авторегрессии.

За последние два десятилетия солнечная энергетика во многих странах (Германия, Испания, США, Япония и др.) стала полноценной отраслью экономики. В 2010–2013 гг. рост занятости в различных секторах солнечной энергетики, например, в США составил от 14 до 35 % [1]. Рост мирового рынка фотоэлектрических элементов составил в 2013 г. 20 % [2]. В России рынок солнечных установок пока развит слабо, кроме того, существующий небольшой спрос удовлетворяется в основном

за счет импортного оборудования. Тем не менее потенциал развития данной отрасли достаточно высок, а «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р) предусматривает достаточно интенсивное развитие возобновляемой энергетики.

Прогнозные параметры поэтапного изменения установленной мощности электростанций России, работающих на возобновляемых источниках энергии и гидроаккумулирующих электростанций, приведены в табл. 1.

Анализируя данные табл. 1, можно сделать вывод о том, что прирост мощностей возобновляемой энергетики до 2015 г. должен составить 7800–11 800 МВт. В течение второго этапа, конкретные временные пределы которого в стратегии не заданы, прирост должен составить 11 000–14 000 МВт к уровню 2015 г., а в течение третьего этапа прирост должен составить 25 000–56 000 МВт к уровню окончания второго

---

<sup>1</sup> Ратнер Светлана Валерьевна – доктор экономических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института проблем управления РАН; e-mail: lanaratner@gmail.com.

Иосифов Валерий Викторович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машиностроения и автомобильного транспорта Кубанского государственного технологического университета; e-mail: iosifov@kstu.ru.

<sup>2</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 13-06-00169 «Моделирование стратегий развития энергетических кластеров в ситуации технологического разрыва».

этапа. Такой существенный рывок в развитии возобновляемой энергетики за столь короткие сроки может быть достигнут только за счет использования наиболее зрелых технологий.

В настоящее время различные технологии возобновляемой энергетики находятся на разных стадиях зрелости (табл. 2). Наиболее вероятным вариантом достижения целей, обозначенных в энергостратегии, является введение в технологический портфель крупных энергетических концернов наиболее зрелых и перспективных технологий, к которым относятся наземная ветровая и солнечная энергетика, а также биогазовые технологии.

В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на прогнозирование динамики основных

экономических параметров производства возобновляемой энергии из различных источников с целью определения наиболее экономически оправданных способов диверсификации региональных топливно-энергетических балансов [3].

Для определения верхнего и нижнего порога рентабельности солнечных проектов (фотоэлектрические панели) нами был проведен сбор доступных статистических данных за последние 15–20 лет. Наиболее репрезентативными оказались выборки данных по США, которые включают 200 000 наблюдений по затратам на строительство и ввод в эксплуатацию энергообъектов за период 1998 по 2012 г. Источниками данных послужили следующие ежегодные отчеты и аналитические обзоры Национальной лаборатории им. Лоу-

Таблица 1

Прогнозные параметры поэтапного изменения установленной мощности электростанций, работающих на возобновляемых источниках энергии и гидроаккумулирующих электростанций

Фактическое значение, 2008 г., МВт	Первый этап (до 2013–2015 гг.) МВт	Второй этап (сроки окончания не определены), МВт	Третий этап (до 2030 г.), МВт
47 200	55 000–59 000	66 000–73 000	91 000–129 000

Таблица 2

Стадии развития технологий возобновляемой энергетики (составлено по данным Electric Power Research Institute (EPRI) за 2010 г.)

Стадии развития	Технологии
Исследования	Наноструктурные фотоэлектрические элементы
Экспериментальные разработки	Энергия приливов и отливов, энергия волн, концентрированные фотоэлектрические установки, газификация биомассы, параболические солнечные коллекторы
Демонстрационные проекты	Геотермальные установки, концентрированные солнечные коллекторы
Начало коммерческого использования	Тонкопленочные фотоэлектрические элементы, шельфовая ветроэнергетика
Распространение коммерческого использования	Фотоэлектрические системы, панельные солнечные коллекторы, биогазовые станции, пеллетные системы, наземная ветроэнергетика
Зрелость	Гидроэнергетика

ренса в Беркли (Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley Lab, LBNL):

- Tracking the Sun III: An Historical Summary of the Installed Price of Photovoltaics in the United States from 1998 to 2009;
- Tracking the Sun IV: An Historical Summary of the Installed Price of Photovoltaics in the United States from 1998 to 2010;
- Tracking the Sun V: An Historical Summary of the Installed Price of Photovoltaics in the United States from 1998 to 2011;
- Tracking the Sun VI: An Historical Summary of the Installed Price of Photovoltaics in the United States from 1998 to 2012.

Кроме того, для прогнозирования динамики рентабельности были использованы данные, представленные в аналитическом обзоре Международного агентства по возобновляемой энергетике (International Renewable Energy Agency, IRENA) «Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. Solar Power. June, 2012» и данные аналитического обзора Института энергетике Университета Мельбурна (Energy Research Institute, The University of Melbourne) «Renewable Energy Technology Cost Review, 2011».

Помимо репрезентативности выборки, данные по динамике стоимости солнечной энергии в США интересны еще как минимум по двум причинам:

1) в период 2000–2012 гг. США находились в позиции «догоняющего» в развитии

солнечной энергетики, постепенно наращивая собственное производство оборудования и осуществляя импортозамещение;

2) уровень инсоляции значительной части территории США близок к уровню инсоляции юга России и других перспективных для развития отрасли территорий.

Сопоставимость данных, представленных в разных информационных источниках для разных классов энергетических объектов, обеспечивалась следующими предположениями (табл. 3).

На рентабельность технологий солнечной энергетики влияют несколько факторов:

- затраты на строительство и ввод в эксплуатацию энергетического объекта;
- стоимость обслуживания и эксплуатации;
- «выход» энергетического объекта – мощность и загруженность мощностей, коэффициент преобразования энергии и т. д.

При прогнозировании динамики капитальных затрат учитывалась структура затрат на строительство и ввод в эксплуатацию энергетического объекта (рис. 1).

Динамика капитальных затрат для солнечных фотоэлектрических проектов в США представлена на рис. 2.

Как видно из диаграммы, представленной на рис. 2, средневзвешенная стоимость инсталлированных солнечных батарей снизилась с 11 долларов за ватт в 1998 г. до 6,2 долл. в 2010 г., что составляет 43 % в ценах 2010 г., или 4,3 % в год. Однако темпы снижения средней стоимости не были по-

Таблица 3

Расчетные технико-экономические параметры фотоэлектрических систем

Технология	Время строительства объекта	Срок эксплуатации	Качество природных ресурсов	Коэффициент использования мощностей
Фотоэлектрические панели	1 год	30 лет	2445 кВтч/м <sup>2</sup> /год	20%

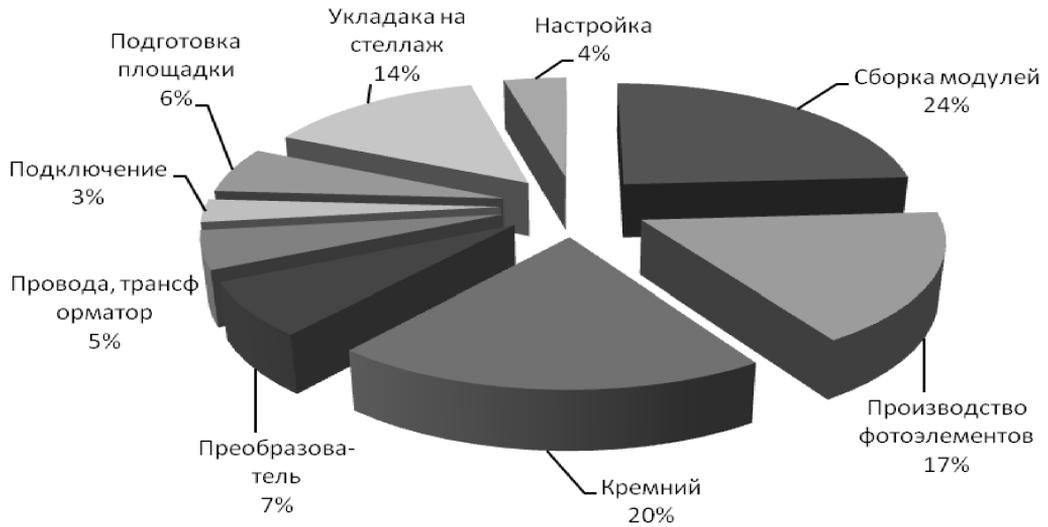


Рис. 1. Структура стоимости проекта по установке солнечных батарей

Составлено по данным Rocky Mountain Institute (2010). *Achieving Low-Cost Solar PV: Balance of System Cost Reductions*, Rocky Mountain Institute. Available at: <http://www.rmi.org/Content/Files/BOSReport.pdf>.

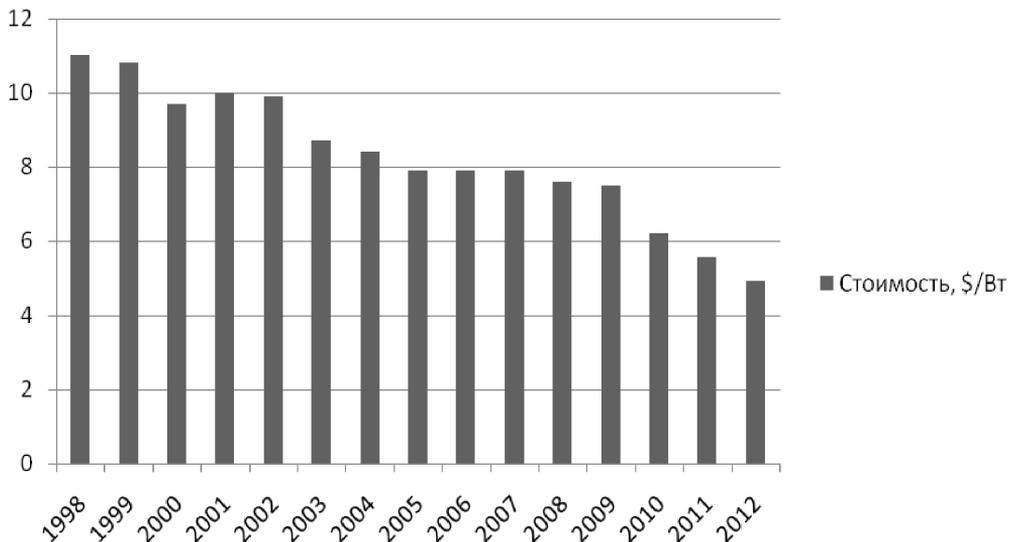


Рис. 2. Динамика стоимости инсталлированных солнечных батарей (оборудование и установка) в США

Составлено по данным [3].

стоянными на протяжении рассматриваемого тринадцатилетнего периода. В период с 1998 по 2005 г. цены на оборудование значительно сократились благодаря совершенствованию технологии и расширению производства. Однако в период с 2005 по 2009 г. произошла стабилизация цен вследствие бурного спроса на солнечные батареи по всему миру. Производственная технологическая цепочка смогла справиться с растущим спросом только к 2010 г., когда стало заметно дальнейшее снижение стоимости инсталляции солнечных батарей. Между 2009 и 2010 г. произошло самое заметное снижение цен (17 %). С 2011 г. мониторинг стоимости стал производиться для разных классов оборудования отдельно. В 2012 г. стоимость проекта по инсталляции солнечных батарей мощностью менее 10 кВт составила 5,3

долл./Вт, тогда как для мощностей от 10 до 100 кВт стоимость была 4,9 долл./Вт, а для мощностей свыше 100 кВт – 4,6 долл./Вт.

По данным за исследуемый период построены авторегрессионные модели Маркова и Юла (табл. 4). Из данных, представленных в таблице, можно сделать вывод о том, что наилучшим образом описывает процесс модель Маркова.

Такое заметное снижение стоимости солнечных проектов произошло благодаря снижению стоимости товаров и услуг по всей технологической цепочке – от производства фотоэлектрических модулей до предоставления услуг по монтажу и присоединению к сети.

Подобная тенденция наблюдалась и в мировом масштабе. На диаграмме, представленной на рис. 3 видно, что за пери-

Таблица 4

Результаты построения моделей авторегрессии по данным [4]

Вид модели	F-статистика	Значимость F-статистики	Коэффициент детерминации	Значимость коэффициентов регрессии
$X(t) = 0,84X(t-1) + 0,1X(t-2)$	1494,14	$P = 0,00000000$	0,9963	$p(a1) = 0,017$ $p(a2) = 0,726$
$X(t) = 0,951X(t-1)$	3820,55463	$P = 0,00000000$	0,9966	$P = 0,00000000$

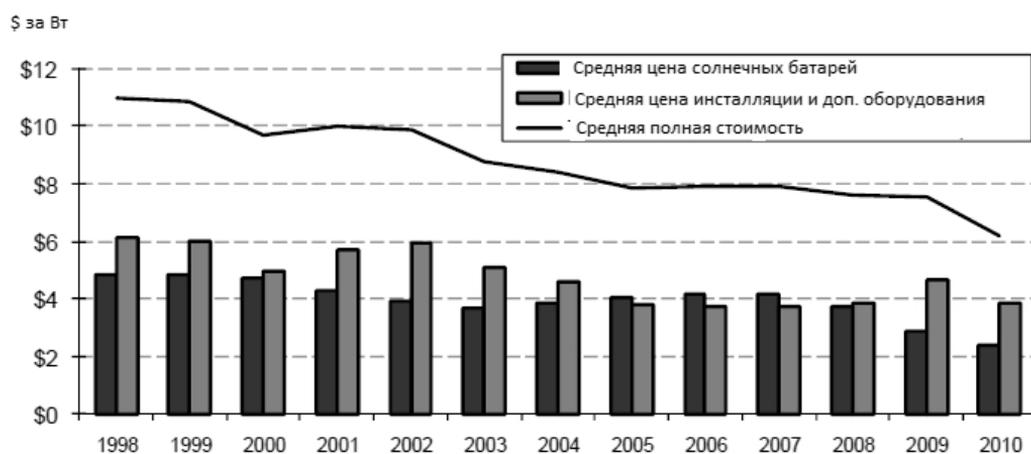


Рис. 3. Структура и динамика стоимости инсталлированных фотоэлектрических систем в мире за период 1998–2010 гг.

Источник: Renewable Energy Technology Cost Review, 2011.

од с 1998 по 2010 г. произошли заметные снижения стоимости, как самих солнечных батарей (на 51 %), так и дополнительного оборудования и инсталляции (на 37 %).

Еще в более явной форме выделенные тенденции просматриваются на данных о стоимости фотоэлектрических модулей и их инсталляции для модулей мощностью менее 10 кВт за период с 1998 по 2012 г. (рис. 4).

Из приведенного графика видно, что стоимость фотоэлектрических модулей в наблюдаемый период сократилась более существенно, нежели стоимость дополнительного оборудования, установки и подключения к сети. Это свидетельствует о том, что потенциал дальнейшего снижения стоимости солнечных проектов лежит в сфере сервиса (установка, подключение, настройка, преобразование сигнала и т. д.).

Различия в динамике отдельных структурных компонент рентабельности технологий солнечной энергетики диктуют необходимость построения прогнозов с учетом различных эффектов, влияющих на стоимость проекта, в первую очередь эффекта обучения и эффекта масштаба. В зарубежных аналитических и прогнозных исследо-

ваниях выделяют следующие разновидности данных эффектов [4]:

- эффект обучения в производстве (learning by doing) – снижение удельных затрат за счет накопления опыта, стандартизации и повышения уровня подготовки кадров;
- эффект обучения в НИОКР (technical efficiency) – снижение удельных затрат за счет совершенствования самой технологии и накопления опыта в исследованиях;
- эффект экономии от масштаба производства (economies of scale through large-volume manufacturing) – снижение удельных затрат за счет расширения производства;
- эффект экономии от масштаба энергетических систем – снижение удельных затрат за счет использование солнечных модулей большей мощности.

Кроме того, необходимо оценить влияние государственных мер поддержки возобновляемой энергетики (льготное налогообложение, премиальные выплаты, ускоренная амортизация, бонусные тарифы

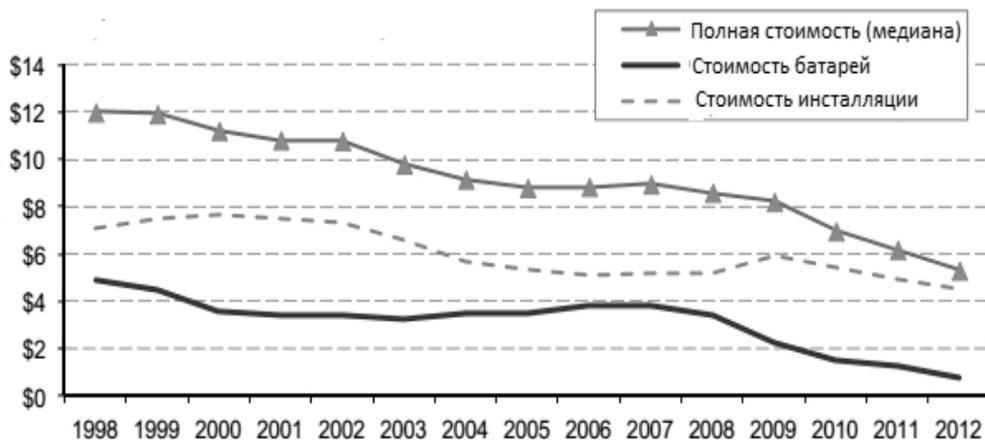


Рис. 4. Структура и динамика стоимости инсталлированных фотоэлектрических систем мощностью до 10 кВт в мире за период 1998–2012 гг.

Источник: Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. Solar Power. June, 2012.

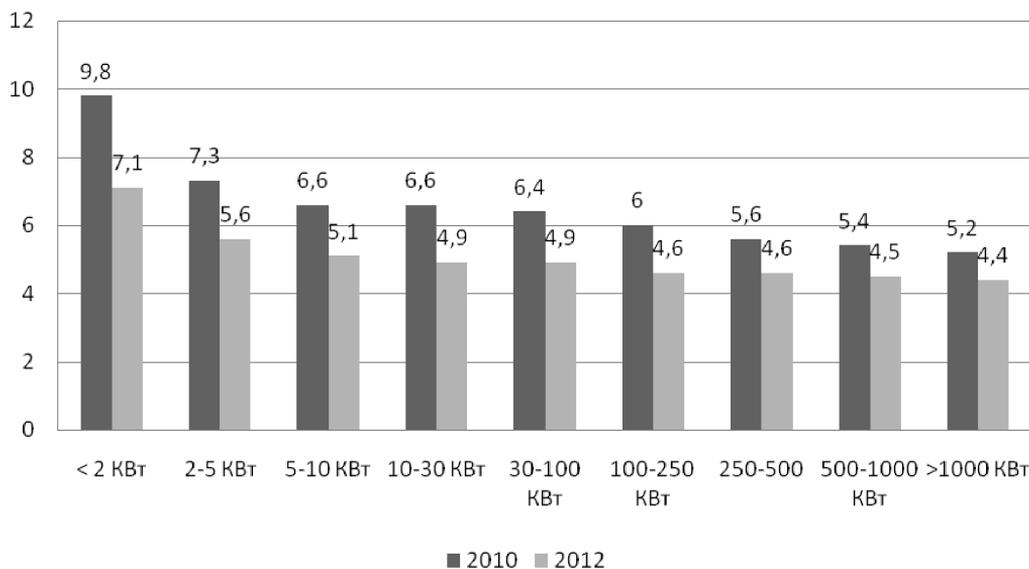
и т. д.) на стоимость проектов. Рассмотрим влияние выделенных эффектов и мер государственной поддержки на динамику исследуемых временных рядов.

**Эффект экономии от масштаба энергосистемы.** Более детальный анализ данных свидетельствует о том, что в секторе солнечной энергетики, так же как и в секторе ветровой энергетики, наблюдается эффект экономии от масштаба самого энергетического объекта. Удельная стоимость более мощных солнечных установок существенно ниже, чем удельная стоимость небольших батарей (рис. 5).

Эффект экономии от масштаба проявляется наиболее сильно при увеличении мощности солнечной батареи от 2 до 5 кВт. Увеличение мощности от 5 до 100 кВт практически не дает эффекта экономии от масштаба, что может быть следствием отсутствия стандартов для установки и эксплуатации солнечных батарей в коммерческом секторе (малый и средний бизнес), в отличие от жилого сектора, который хорошо стандартизирован.

**Эффект экономии от масштаба производства.** В межстрановом сопоставлении самые низкие цены на солнечные батареи наблюдаются в Германии. Скорее всего, такая разница в ценах объясняется размером рынка, который, например, составил в 2010 г. в Германии 17 000 МВт установленной мощности, тогда как в США в 8 раз меньше – 2100 МВт инсталлированных мощностей (рис. 6). Однако данный фактор не является единственным, так как разница наблюдается в действии налоговых и иных правительственных стимулов, цене труда, цене на модули для солнечных батарей, стандартах подключения [5].

Обозначенная тенденция, несмотря на существенное снижение стоимости солнечных проектов в США в 2011–2012 гг., пока в целом сохраняется. Наибольший разрыв в стоимости инсталлированных солнечных батарей мощностью до 5 кВт, распространенных в жилом секторе, наблюдается с Германией (рис. 7).



*Рис. 5. Проявления эффекта экономии от масштаба энергосистем в США*  
Составлено по данным [4].

Разница в стоимости наблюдается и для других классов солнечных панелей (рис. 8).

Оценить раздельное влияние эффекта масштаба производства и эффекта обучения по имеющимся данным не представляется возможным. Используя методологию Бостонской консалтинговой группы [6],

их совместное влияние можно оценить как 22 %-е сокращение стоимости при удвоении объемов производства в течение всего исследуемого периода.

**Меры государственной поддержки.**

Важным фактором роста сектора солнечной энергетики США и снижения стоимо-

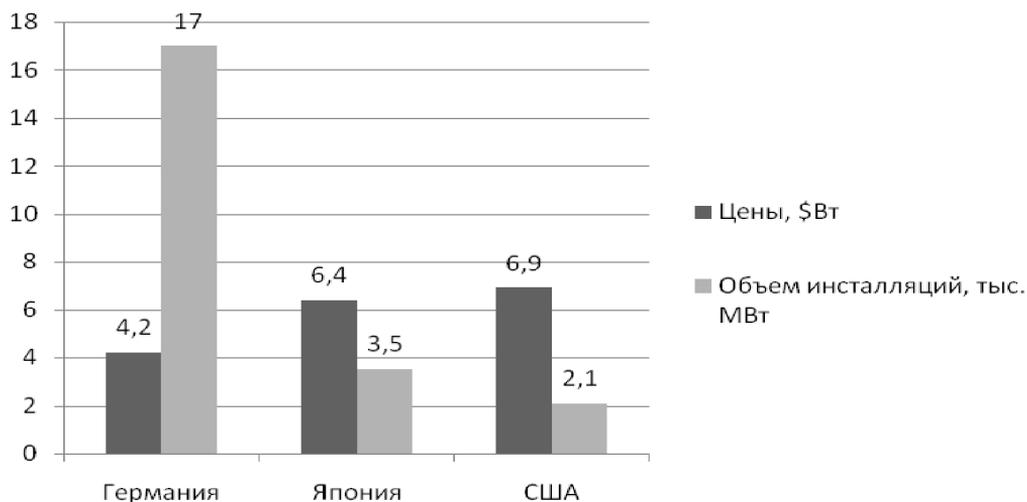


Рис. 6. Цены и объемы инсталляций солнечных батарей в 2010 г. в межстрановом сопоставлении

Составлено по данным [4].

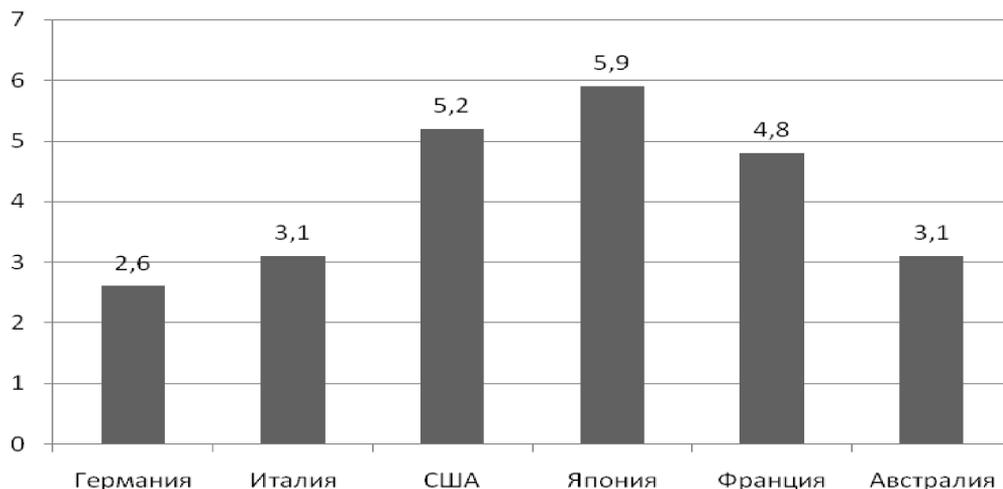


Рис. 7. Стоимость инсталлированных солнечных модулей в жилом секторе (до 5 кВт) в 2012 г. (долл./Вт)

Составлено по данным [4]

сти солнечных проектов являются меры государственной поддержки, к которым относятся скидки на приобретение оборудования, инвестиционные налоговые кредиты, гранты и бонусные тарифы на продажу энергии из возобновляемых источников (сертификаты REC или их разновидность для солнечной энергетики – SREC), а также возможность ускоренной амортизации солнечных батарей [7]. Эти меры в различных сочетаниях варьируются от штата к штату.

Имеющиеся данные в основном фокусируются на динамике скидок, которые предоставляются либо единовременно при установке солнечных батарей и зависят от мощности фотоэлектрических модулей, либо предоставляются ежегодно в зависимости от объема произведенной энергии (рис. 9).

Пиковые значения скидок наблюдались в 2001–2002 гг. В дальнейшие годы происходило постепенное снижение объемов государственной поддержки, что тем не

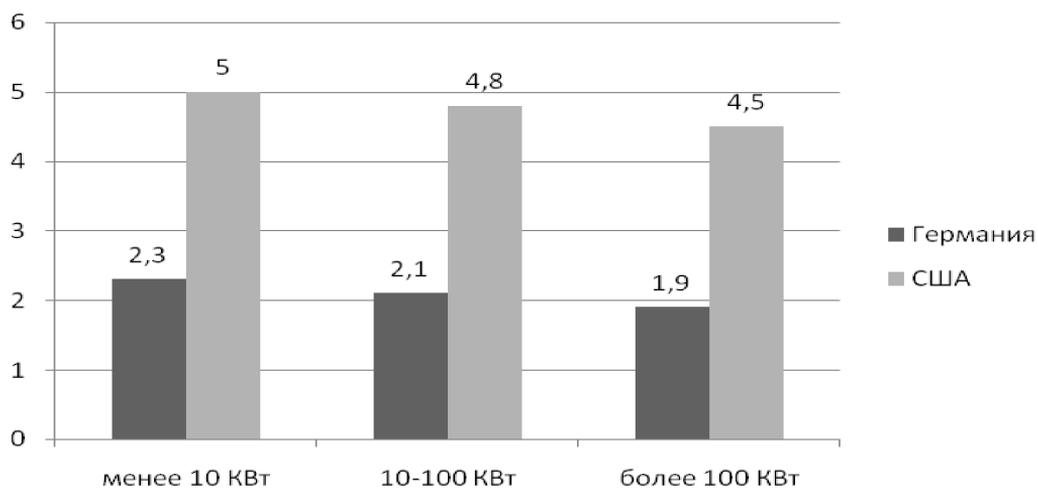


Рис. 8. Стоимость установленных солнечных модулей различной мощности в Германии и США в 2012 г. (долл./Вт)

Составлено по данным [4].

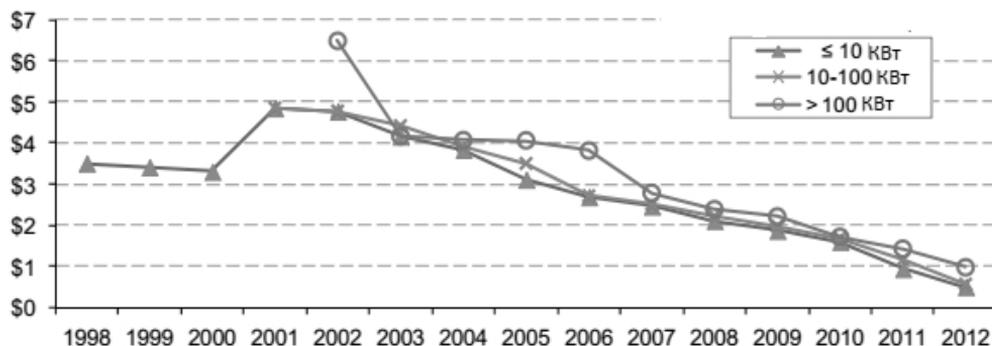


Рис. 9. Меры государственной поддержки солнечной энергетики (долл./Вт)

менее сопровождалось снижением общих цен. Снижение скидок с 2002 по 2012 г. произошло, в среднем на 4 долл./Вт, что приблизительно составляет 85–90 % или 8,5–9 % в год.

Таким образом, за исследуемый период капитальная стоимость солнечных фотоэлектрических систем снижалась в среднем на 5 % при снижении мер государственной поддержки на 8,5–9 % в год. Учитывая тот факт, что меры государственной поддержки не превышают 50 % от стоимости капитальных затрат, можно оценить снижение капитальных затрат в исследуемый период как 6–7 % в год. Однако дальнейший потенциал снижения мер государственной поддержки, как видно из графика на рис. 9, практически исчерпан, поэтому его вклад в дальнейшее снижение капитальных затрат можно не учитывать.

Оценка влияния эффекта обучения в НИОКР представляет собой самостоятельную сложную научную задачу, решение которой выходит за рамки настоящей работы. Ее сложность связана с тем, что в условиях открытой экономики технологический прогресс отдельной страны и развитие определенных технологий (в данном случае – технологий солнечной энергетики) зависят не только от интенсивности собственных исследований и разработок, но и от международной технологической диффузии. При этом многие исследователи (см., например, [8, 9]) выделяют как минимум три возможных канала технологической диффузии: импорт инновационной продукции, прямые иностранные инвестиции и использование иностранных патентов и лицензий. Каждый из указанных каналов может иметь различные показатели интенсивности, которые необходимо учитывать в итоговой оценке изучаемого эффекта. Поэтому в данной работе будем считать, что действие эффекта обучения в НИОКР наблюдается в общей динамике стоимости солнечных проектов и описывается моделями авторегрессии, приведенными в табл. 4.

Кроме капитальных затрат, на рентабельность и срок окупаемости «солнечного» проекта также влияет стоимость эксплуатации и обслуживания. Однако для фотоэлектрических модулей эта сумма является сравнительно небольшой относительно капитальных затрат.

Полученные качественные и количественные характеристики динамики развития отрасли солнечной энергетики в США могут быть использованы для построения прогнозов динамики основных экономических показателей «солнечных проектов» в России при условии их реализации в регионах с аналогичным уровнем инсоляции. Учитывая мизерный объем рынка фотоэлектрических модулей в России на сегодняшний день, для расчета нижнего порога рентабельности технологии используем удельную стоимость инсталляции солнечного модуля в США мощностью от 5 до 30 кВт в 2010 г. Для расчета верхнего порога рентабельности используем стоимость инсталляции 1 Вт в Германии в 2012 г. для установок мощностью более 100 кВт. Стоимость эксплуатации и обслуживания, а также стоимость капитала (стоимость заемного финансирования) при построении модели не учитывается.

Тогда динамика возврата от инвестиций в технологий солнечной энергетики может быть описана следующим рекуррентным соотношением:

$$R(i) = \frac{SD(R) \cdot 4,8 \cdot PW \cdot P(R)}{6600 - 0,07 \cdot (i - 1) \cdot 6600} \times \\ \times I(i - 1) + R(i - 1), \quad (1)$$

где  $R(i)$  и  $I(i)$  – возврат от инвестиций и объем инвестиций в  $i$ -й год прогнозного периода соответственно;

$SD(R)$  – количество солнечных дней в году в регионе планируемой реализации проекта;

$PW$  – мощность энергообъекта (от 5 до 30 кВт);

$P(R)$  – тариф на электроэнергию в регионе реализации проекта (единицы измерения долл. США).

Числитель первого слагаемого формулы (1) должен рассчитываться для каждого региона на основе локальных данных по уровню инсоляции и количеству солнечных дней в году [3]. В случае использования для расчета данных, соответствующие уровню инсоляции южных регионов России (Краснодарский и Ставропольский край), формула (1) принимает следующий вид:

$$R(i) = \frac{194,2}{6600 - 0,07 \cdot (i - 1) \cdot 6600} \times \\ \times I(i - 1) + R(i - 1).$$

**Выводы.** Построенная модель (1), равно как и полученные оценки эффектов обучения и масштаба, могут быть использованы как частными инвесторами, так и соответствующими государственными структурами в качестве приближенной

оценки в целях определения наиболее перспективных направлений инвестирования и выбора наиболее экономически оправданных способов диверсификации региональных топливно-энергетических балансов [10]. Однако «срок годности» полученных результатов ограничен временем жизненного цикла самой технологии фотоэлектрического преобразования, максимальный КПД которой в настоящее время составляет 26,1–26,4 % [11].

Поэтому наиболее ценным результатом проведенного исследования, на наш взгляд, является сама методика построения прогноза и полученные оценки эффекта масштаба производства и масштаба энергосистемы, которые могут быть использованы даже в случае изменений верхнего и нижнего порогов удельных капитальных затрат.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. The Solar Foundation. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://thesolarfoundation.org> (дата обращения: 02.02.2014).
2. TOP PV Module Suppliers in 2013 // Module Tracker Quarterly Report. 2014. January. 24 p.
3. Березюк М.В., Румянцева А.В., Мерзликина Ю.Б., Макарова Д.Н. Выбор наилучших доступных технологий: экономические аспекты // Вестн. УрФУ. Серия экономика и управление. 2014. № 2. С. 109–121.
4. Tracking the Sun VI: An Historical Summary of the Installed Price of Photovoltaics in the United States from 1998 to 2012 / Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley Lab, LBNL, 2013. 167 p.
5. Ратнер С.В., Иосифов В.В. Стимулирование развития высокотехнологичных отраслей экономики (на примере машиностроения в Германии) // Вестн. УрФУ. Серия экономика и управление. 2012. № 4. С. 46–58.
6. Ратнер С.В. Управление технологической структурой производства энергетических компаний : Материалы Международ. науч.-практ. конф. «Управление инновациями – 2013». Москва-Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ (НПИ). С. 106–110.
7. Ратнер С.В. Социально-экономические эффекты развития альтернативной энергетики в США // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2012. № 28. С. 47–55.
8. Lei R., Zhang Y., Wei S.. International Technology Spillover, Energy Consumption and CO2 Emissions in China // Low Carbon Economy. 2012. Vol. 3. P. 49–53.
9. Hossain S. An Econometric Analysis for CO2 Emissions, Energy Consumption, Economic Growth, Foreign Trade and Urbanization of Japan // Low Carbon Economy. 2012. Vol. 3. P. 92–105.
10. Яшалова Н.Н. «Зеленая» экономика как основа эколого-экономического устойчивого развития регионов // Вестн. УрФУ. Серия экономика и управление. 2013. № 2. С. 81–94.
11. Energy Futures. MIT Energy Initiative. Autumn, 2012. 51 p.