

УДК 338.2

**С.В. Ратнер**

**СТОИМОСТНОЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ  
В МИРЕ И ЕЁ ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ РОССИИ\***

**S.V. Ratner**

**COST ANALYSIS OF SOLAR ENERGY DEVELOPMENT  
IN THE WORLD AND ITS SIGNIFICANCE FOR RUSSIA**

Исследуется динамика развития отрасли солнечной энергетики в период роста спроса, выделяются такие ее качественные особенности, как эффект от масштаба производства и эффект обучения. Полученные результаты могут использоваться для прогнозирования развития солнечной энергетики в России в условиях реализации целей, обозначенных в Энергетической стратегии России на период до 2030 года.

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА; ПРОГНОЗИРОВАНИЕ; СТОИМОСТНОЙ АНАЛИЗ; ЭФФЕКТ ОБУЧЕНИЯ; ЭФФЕКТ МАСШТАБА; КРИВАЯ ОБУЧЕНИЯ; ЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИЯ.

This paper investigates the dynamics of development in the growing solar energy sector and studies such properties of it as the effect of scale and learning effects. The results of the research can be used in order to forecast the development of solar energy in Russia under the goals outlined in the Energy Strategy of Russia for the period up to 2030.

SOLAR ENERGY; FORECASTING; COST ANALYSIS; LEARNING EFFECTS; SCALE EFFECT; LEARNING CURVE; LINEAR REGRESSION.

За последние два десятилетия солнечная энергетика во многих странах мира стала полноценной отраслью экономики. Бесспорным лидером по объему инсталляций солнечных модулей в течение всего данного периода остается Европа (17159 МВт в 2012 г. [1]), однако львиную долю производства фотоэлектрических элементов и модулей для «солнечных» проектов осуществляют Китай и США. В 2011 г. — пиковый год для производства фотоэлектрических модулей — объем мирового рынка солнечных элементов составил около 40 млрд долл. (рис. 1). Высокие темпы роста (до 30 % в год) данного рынка в предыдущие годы сделали его настолько привлекательным, что в 2011 г. в мире насчитывалось уже более 150 производителей солнечных элементов по различным технологиям, а предложение впервые в истории гелиоэнергетики существенно превысило спрос [2].

В России рынок солнечных установок пока развит слабо (менее 8 МВт) [1], кроме того, существующий небольшой спрос удовлетворяется в основном за счет импортного оборудования. Тем не менее, потенциал раз-

вития данной отрасли достаточно высок, а Энергетическая стратегия России на период до 2030 года предусматривает не только интенсивное развитие возобновляемой энергетики, в том числе гелиоэнергетики, но и обеспечение генерации возобновляемой энергии отечественным оборудованием на 95–97 % к 2030 г. [3]. Это означает, что в России уже к 2020 г. должно появиться, как минимум, несколько новых высокотехнологичных секторов промышленности, среди которых — сектор производства фотоэлектрических модулей и сектор проектирования, строительства и эксплуатации гелиостанций.

Необходимость развития практически «с нуля» новых высокотехнологичных секторов промышленности в условиях жесткой конкуренции на мировых рынках диктует актуальность исследований, направленных на изучение качественных особенностей динамики целого ряда экономических параметров «солнечных» проектов, в первую очередь, их рентабельности [4]. В нескольких предыдущих работах нами изучались такие факторы, влияющие на стоимость энергии, генерируемые

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

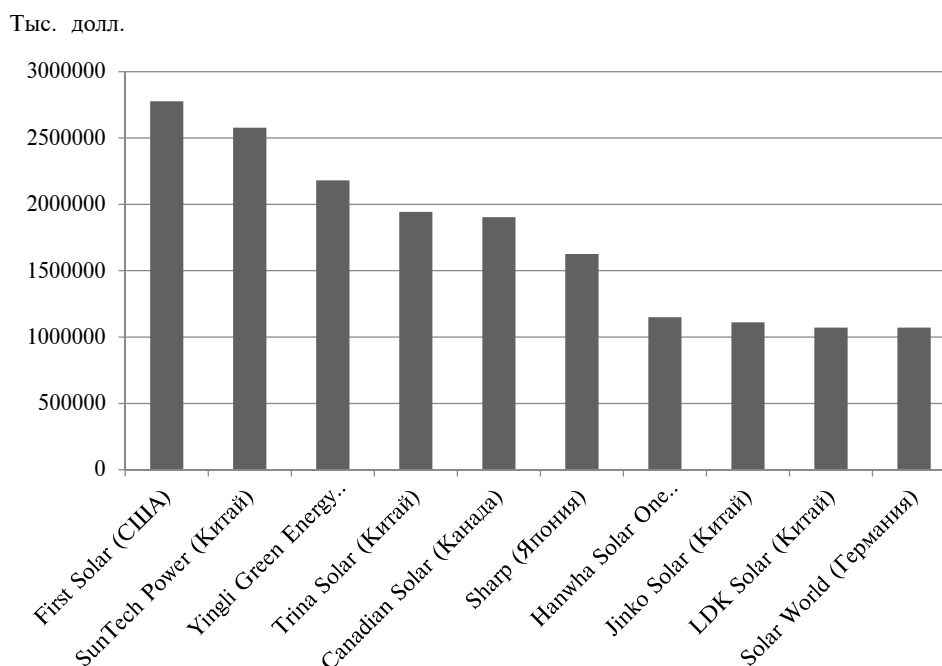


Рис. 1. Топ-10 производителей солнечных элементов и модулей в 2011 г. [1–2]

«солнечными» энергообъектами, как государственное стимулирование спроса на солнечные батареи, стоимость альтернативных видов энергии и др. [5–6]. Цель данного исследования на основе эмпирических данных по отрасли в период ее наиболее бурного роста – установить динамику капитальных затрат «солнечных» проектов в зависимости от следующих эффектов [7]:

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

**Эффект экономии от масштаба энергосистемы.** Оценивался на основе данных ежегодных аналитических обзоров Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли (Ernest Orlando Lawrence Berkeley National

Laboratory, Berkeley Lab, LBNL) за период 1998–2012 гг. в США. Выявлено, что данный эффект проявляется наиболее сильно при увеличении мощности солнечной батареи от 1 до 3 кВт (рис. 2). Увеличение мощности от 10 до 100 кВт практически не дает эффекта экономии от масштаба [4], 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 в США хорошо стандартизирован.

Снижение удельной стоимости инсталлированных солнечных модулей в зависимости от увеличения их мощности наблюдается и в других странах. Так, например, в Германии по данным 2012 г. стоимость 1 Вт солнечных установок мощностью до 10 кВт составляла 2,3 долл., тогда как для установок мощностью от 10 до 100 кВт и более – 2,1 и 1,9 долл. соответственно [7]. Линейный характер исследуемой зависимости объясняется высоким уровнем развития системы стандартизации солнечной энергетики в Германии, охватывающей без исключения все классы солнечных установок, а также распространением практики подключения солнечных модулей к общей электросети для продажи излишков энергии в сеть.

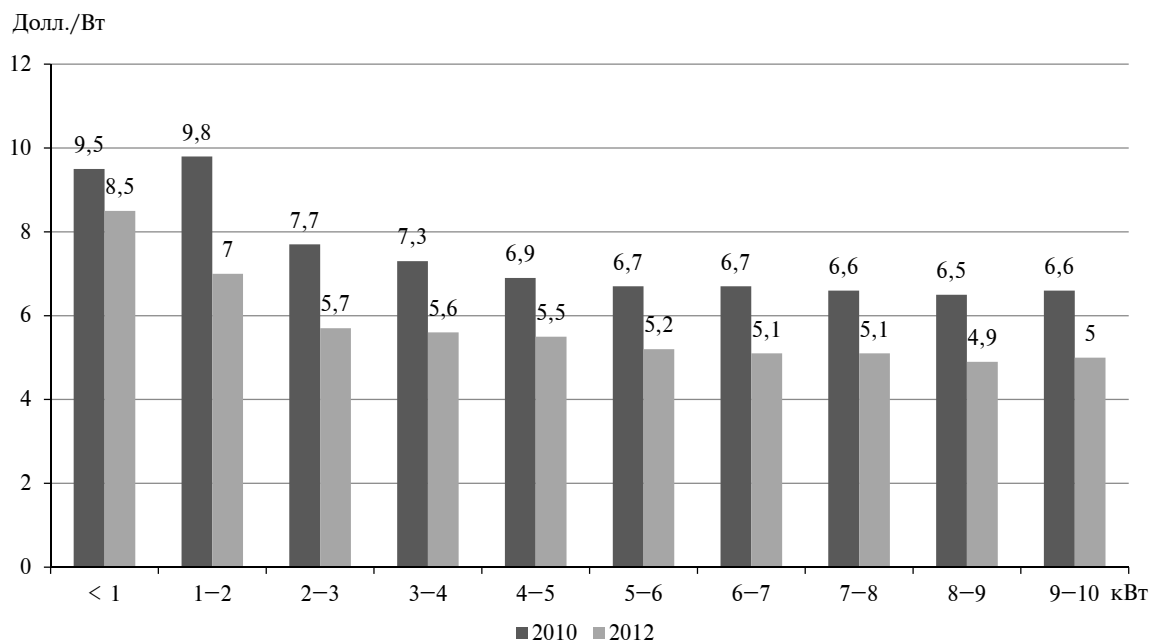


Рис. 2. Проявление эффекта экономии от масштаба энергосистем в США [7]

**Эффект экономии от масштаба производства.** Оценивался по данным аналитического обзора Института энергетики Университета Мельбурна (Energy Research Institute, The University of Melbourne) «Renewable Energy Technology Cost Review, 2011» и ежегодным отчетам одного из лидеров сектора производства солнечных элементов и модулей американской компании First Solar за период 2005–2013 гг. [8]. Данные источники отмечают, что за период с 1998 по 2012 г. произошло заметное снижение стоимости как самих солнечных батарей (на 51 %), так и дополнительного оборудования и инсталляции (на 37 %).

Однако 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 рода тока и т. д.), а наиболее существенное влияние эффектов от масштаба производства, обучения в производстве и обучения в НИОКР проявилось в наблюдаемый период именно в сфере производства фотоэлектрических элементов и мо-

дулей. Поэтому дальнейшее исследование указанных эффектов будем проводить, основываясь на данных мирового лидера в сфере производства фотоэлектрических элементов компании First Solar (США).

Компания First Solar начала производство теллурийд-кадмиевых фотоэлектрических модулей на пилотной линии в Питсбурге (штат Охайо) в январе 2002 г. В 2003 и 2004 гг. производство модулей на пилотной линии продолжалось одновременно с развертыванием базовой производственной линии мощностью 25 МВт в год. Выход на запланированную мощность состоялся в ноябре 2004 г. В 2005 г. была запущена еще одна производственная линия мощностью 25 МВт в Охайо, выход на полную мощность произошел в августе 2006 г. В феврале 2006 г. компания начала строительство производственных мощностей в Германии (Франкфурт), четырех линий мощностью по 25 МВт в год. Выход на полную мощность был осуществлен во втором полугодии 2007 г. В 2007 г. началось строительство производственных мощностей в Малазии (16 производственных линий по 25 МВт), которые были запущены в 2008–2009 гг. Интенсивное наращивание производственных мощностей и объемов производства позволило компании существенно

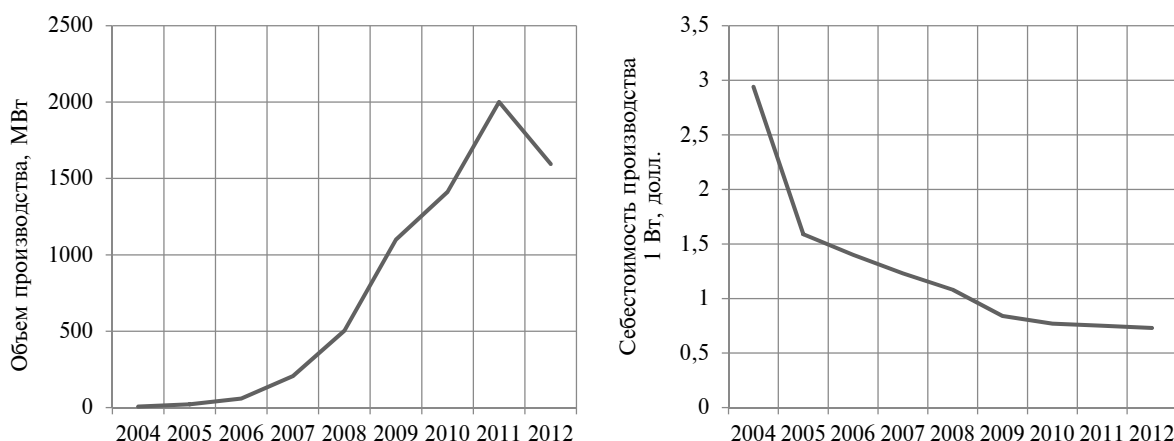


Рис. 3. Проявление эффектов экономии от масштаба производства и обучения [8]

снизить себестоимость продукции (рис. 3). Однако в 2011 г. рыночная ситуация кардинально изменилась: производство солнечных модулей в мире превысило спрос. Цена на солнечные модули и их компоненты упала до исторических минимумов и практически сравнялась с себестоимостью. Поэтому компания заморозила ряд начатых в предыдущие годы проектов во Вьетнаме, Франции и США (штат Аризона), а также была вынуждена искать пути снижения операционных расходов.

Зависимость производственных расходов<sup>1</sup> от объема производства компании удалось представить в виде модели линейной регрессии вида:

$$Y = 1096,1332 \cdot X, \quad (1)$$

где  $Y$  – производственные расходы (в тыс. долл.);  $X$  – объем производства, МВт. Коэффициент детерминации модели  $R^2 = 0,94$ ,  $F$ -статистика Фишера равна 118,7145, уровень

<sup>1</sup> К производственным расходам отнесены стоимость сырья и материалов (закаленное заднее стекло, переднее стекло с покрытием из прозрачных проводящих оксидов, теллурид кадмия, триплекс, коннектор и др.), прямые расходы на труд, а также общепроизводственные расходы, связанные с выполнением инженерных работ, работ по поддержанию оборудования в рабочем состоянии, расходы на охрану труда и окружающей среды, контроль качества. С 2005 г. производственные расходы также включают амортизацию производственных мощностей и оборудования, расходы на их содержание, стоимость гарантийного обслуживания солнечных модулей и их утилизации по истечении срока эксплуатации [2].

значимости  $F$ -статистики при восьми степенях свободы равен 0,000012.

Средний коэффициент эластичности, рассчитанный по формуле

$$\bar{E} = \frac{\partial Y}{\partial x} \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{y}} = 0,988, \quad (2)$$

показывает, что увеличение объема производства на 1 % приводит к увеличению производственных затрат на 0,99 %.

**Эффект обучения в производстве.** Оценивался на основе использования методологии Бостонской консалтинговой группы [9] по данным [8]. Предложенный подход связывает кумулятивное накопление опыта производства определенного продукта со снижением удельных издержек. Прогнозы, полученные на основе данной методологии, не учитывают рыночные колебания цен и внезапные технологические прорывы, однако позволяют с достаточной степенью точности оценить перспективы развития отрасли в периоды устойчивого роста. В расчетах принята простейшая модель кривой обучения:

$$C(Q) = C_1(1 - \lambda)^{\log_2 Q}, \quad (3)$$

где  $C_1$  – исходные удельные издержки (в 2004 г. – 2,94 долл./Вт);  $Q$  – кумулятивный объем производства (в конце 2012 г. – 6905,1 МВт);  $\lambda$  – темп обучения.

Решение уравнения (3) относительно  $\lambda$  позволяет оценить темп обучения в компании как 10 %-е снижение удельных издержек при удвоении кумулятивного объема производства.

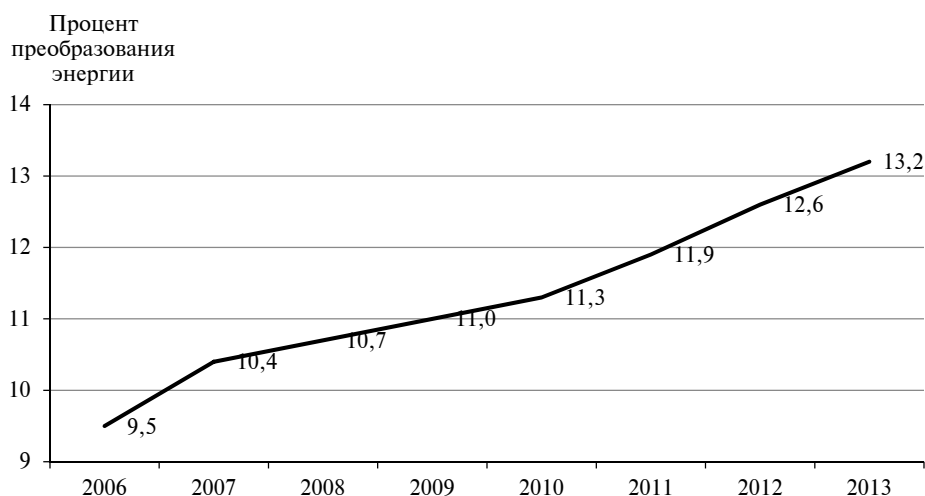


Рис. 4. Динамика эффективности технологии теллурийд-кадмиевых тонкопленочных солнечных преобразователей (средний коэффициент преобразования по всей линейке продукции) [10]

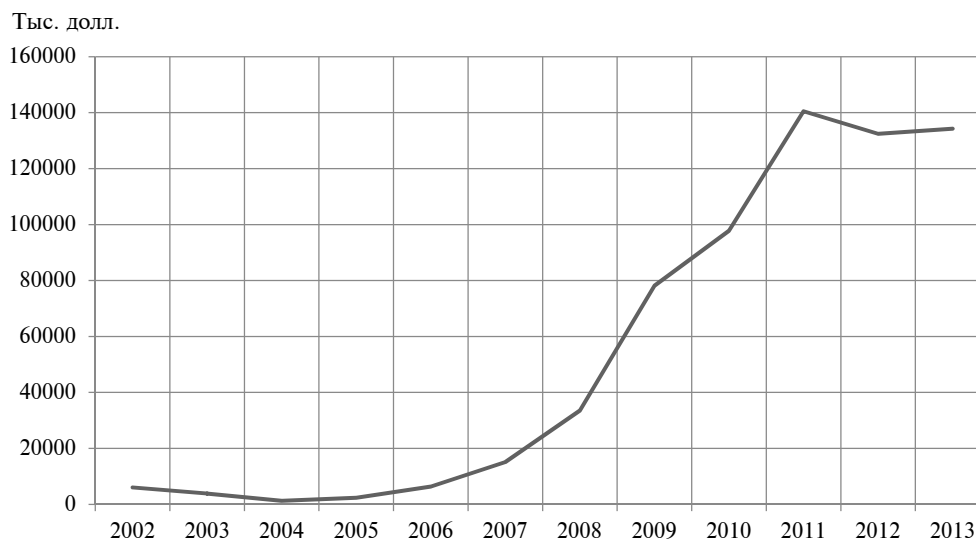


Рис. 5. Динамика затрат на НИОКР компании First Solar [8]

**Эффект обучения в НИОКР (technical efficiency).** Также оценивался по данным ежегодных отчетов компании First Solar за период 2005–2013 гг. [6]. На протяжении всего исследуемого периода компания последовательно развивала технологию теллурийд-кадмиевых (CdTe) тонкопленочных солнечных модулей, добившись значительных успехов в увеличении ее эффективности (рис. 4). В 2013 г. компания объявила о достижении нового мирового рекорда по показателю преобразования солнечной энергии в электрическую – 20,4 % [10]. Лабораторные образцы фотоэлектрических преобразователей

с таким коэффициентом преобразования будут запущены в серийное производство уже в ближайшие годы, что, как ожидается, приведет к дальнейшему снижению удельных издержек.

В течение всего исследуемого периода компания постоянно наращивала объемы внутренних затрат на НИОКР (рис. 5), которые включают, в основном, оплату труда исследователей и стоимость исследовательского оборудования. В общие объемы затрат также включены суммы полученных компанией исследовательских грантов от различных научно-инновационных фондов.

## Результаты расчета темпов обучения в НИОКР\*

Зависимая переменная	Значение в начале периода $C_1$	Значение в конце периода $C(Q)$	Кумулятивный объем затрат на НИОКР $Q$ , тыс. долл.	Оцениваемый параметр (темп обучения в исследуемый период) $\lambda$ , %
Коэффициент преобразования энергии, %	9,5 (2006)	13,5 (2013)	638 226 (2006–2013)	1,7
Интенсивность НИОКР, %	9,17 (2004)	4,06 (2013)	641 838 (2004–2013)	0,04
Удельные издержки производства	2,94 (2004)	0,73 (2012)	507 538 (2004–2012)	7

\* Составлено по данным ежегодных отчетов компании First Solar.

Методология кривой обучения позволяет оценить, как накопление опыта исследований (измеряемого как кумулятивный объем затрат на НИОКР) влияет на следующие основные показатели эффективности НИОКР:

- увеличение коэффициента преобразования энергии;
- снижение интенсивности НИОКР (доли затрат на НИОКР в общей выручке компании);
- снижение удельных издержек производства.

Для определения эффекта обучения в НИОКР по данным показателям решим уравнение относительно  $\lambda$ , подставив в формулу (3) последовательно значения из колонок приведенной здесь таблицы.<sup>2</sup> Заметим, что различия в значениях кумулятивных затрат на НИОКР (4-я колонка таблицы) обусловлены тем, что требуемые для моделирования эмпирические данные по коэффициенту преобразования, интенсивности НИОКР и удельным издержкам представлены по различным временным периодам. Результаты расчетов темпа обучения в НИОКР в том случае, когда данный эффект проявляется: 1) в увеличении коэффициента преобразования энергии, 2) в снижении интенсивности НИОКР, 3) в снижении удельных издержек, представлены в последней колонке таблицы.

Таким образом, при удвоении объемов затрат на НИОКР в течение исследуемого периода компания продемонстрировала следующие результаты: увеличение коэффициента преобразования энергии на 1,7 %, снижение

доли затрат на НИОКР в общем объеме продаж на 0,04 %, снижение удельных издержек производства солнечных модулей на 7 %.

Следует отметить, что начиная с 2008–2009 гг. все более значимым направлением деятельности компании является обслуживание энергетических объектов, построенных с использованием произведенного компанией оборудования. Поэтому часть средств, выделенных на НИОКР, направлялась не только на исследования и разработки в области совершенствования технологии производства теллурий-кадмиевых тонкопленочных элементов и модулей, но и на совершенствование процессов проектирования и обслуживания энергетических объектов. Однако выделить долю затрат на данное направление в общем объеме затрат на НИОКР компании по имеющимся данным не представляется возможным.

Также необходимо отметить, что оценка влияния эффекта обучения в НИОКР на приведенные показатели в общем случае представляет собой самостоятельную сложную научную задачу. Ее сложность связана с тем, что в условиях открытой экономики технологический прогресс отдельной компании и развитие определенных технологий (в данном случае – теллурий-кадмиевых тонкопленочных фотоэлектрических модулей) зависят не только от интенсивности собственных исследований и разработок, но и от эффекта технологического спилловера (технологической диффузии) [11–13]. При этом многие исследователи (см., например, [12–13]) выделяют, как минимум, три возможных канала технологической диффузии: участие в корпоративных НИОКР (или научно-инновационных сетях),

<sup>2</sup> То есть решим три уравнения вида (3) относительно переменной «темп обучения».

участие в стратегических производственных альянсах и приобретение патентов и лицензий. Каждый из указанных каналов может иметь различные показатели интенсивности, которые необходимо учитывать в итоговой оценке изучаемого эффекта. Однако в силу того, что компания First Solar на протяжении всего исследуемого периода и по настоящее время является мировым лидером в области производства теллурий-кадмиевых тонкопленочных модулей, указанные выше эффекты технологического спilloвера в оценках не учитывались.

Таким образом, неизбежность более или менее интенсивного развития возобновляемой энергетики определяется стратегическими ориентирами, положенными в основу Энергетической стратегии и Инновационной стратегии России. Послужит ли это развитие импульсом к возрождению российских наукоемких и высокотехнологичных секторов экономики, таких как химическая промышленность, энергетическое машиностроение, приборостроение и др. или будет стимулировать только рост импорта в структуре товарооборота РФ, во многом зависит от того, насколько хорошо обоснованы и экономически целесообразны будут конкретные инвестиционные программы и проекты, реализуемые в регионах.

Солнечная энергетика сегодня — одна из наиболее зрелых технологий возобновляемой энергетики, а реализуемые на ее основе про-

екты могут быть коммерчески эффективными даже при отсутствии государственного субсидирования [14]. Природно-климатические условия во многих регионах России позволяют использовать данную технологию генерации энергии, а наличие производственных традиций, дает возможность надеяться на развертывание полномасштабного отечественного производства фотоэлектрических модулей для удовлетворения, в первую очередь, внутреннего спроса, бурный рост которого в ближайшие годы прогнозируется на основе анализа целей, указанных в Энергетической стратегии России.

Представленные качественные и количественные характеристики динамики развития сектора производства фотоэлектрических модулей могут быть использованы как частными инвесторами, так и соответствующими государственными структурами, в качестве приближенной оценки необходимых объемов производства, планирования производственных мощностей и оптимизации способов построения полной технологической цепи для обеспечения максимальной коммерческой привлекательности «солнечных» проектов. Полученные результаты также могут использоваться в целях определения наиболее перспективных направлений инвестирования в энергетические проекты и выбора наиболее экономически оправданных способов диверсификации региональных топливно-энергетических балансов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Market Outlook for Photovoltaics in 2011–2015. EPIA, Brussels, 2012, p. 60.
2. First Solar. Annual Report — 2011. Tempe (AZ), USA, 2012, p. 172.
3. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года: утв. Распоряж. Правительства РФ № 1715-р от 13.11.2009 г.
4. **Ратнер С.В.** Прогнозирование динамики основных экономических показателей проектов в области солнечной энергетики // Стратегическое планирование и развитие предприятий: матер. 15 Всерос. симп. / под ред. чл.-корр. РАН Г.Б. Клейнера. Секция 4, Москва, 15–16 апреля 2014 г. М.: ЦЭМИ РАН, 2014. С. 158–161.
5. **Ратнер С.В., Нарижная О.Ю.** Формирование рынка возобновляемой энергии в Индии: механизмы и инструменты международной и государственной поддержки // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2013. № 10. С. 47–53.
6. **Ратнер С.В.** Финансирование проектов в области альтернативной энергетики и энергоэффективности: международный опыт и российские реалии // Финансы и кредит, № 24, 2013, стр. 12–18
7. 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.
8. URL: [www.firstsolar.com](http://www.firstsolar.com)
9. **Ратнер С.В.** Социально-экономические эффекты развития альтернативной энергетики в США // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2012. № 28. С. 47–55.
10. First Solar. Annual Report — 2013. Tempe (AZ), USA, 2012, p. 178.

11. **Hinloopen J.** More on Subsidizing Cooperative and Noncooperative R&D in Duopoly with Spillovers // *Journal of Economics*, 2000, no. 72(3), pp. 295–308.

12. **Suzumura K.** Cooperative and Noncooperative R&D in an Oligopoly with Spillovers // *American*

*Economic Review*, 1992, no. 82(5), pp. 1307–1320.

13. **Воронина Л.А., Ратнер С.В.** Научно-инновационные сети в России: опыт проблемы, перспективы. М.: Инфра-М, 2010. 254 с. (Научная мысль).

## REFERENCES

1. Global Market Outlook for Photovoltaics in 2011–2015. EPIA, Brussels, 2012, p. 60.

2. First Solar. Annual Report – 2011. Tempe (AZ), USA. 2012, p. 172.

3. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda. Utverzhdena rasporyazheniyem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii № 1715-r ot 13.11.2009 g. (rus)

4. **Ratner S.V.** Prognozirovaniye dinamiki osnovnykh ekonomicheskikh pokazateley proyektov v oblasti solnechnoy energetiki. *Strategicheskoye planirovaniye i razvitiye predpriyatiy*. Materialy pyatnadsatogo vsrossiyskogo simpoziuma. Sektsiya 4, Moskva, 15–16 aprelya 2014 g. Pod red. Chlen-korr. RAN G.B. Kleynera. M.: TsEMI RAN, 2014. S. 158–161. (rus)

5. **Ratner S.V., Narizhnaya O.Yu.** Formirovaniye rynka vozobnovlyayemoy energii v Indii: mekhanizmy i instrumenty mezhdunarodnoy i gosudarstvennoy podderzhki. *Natsionalnyye interesy: priority i bezopasnost*. 2013. № 10. S. 47–53. (rus)

6. **Ratner S.V.** Finansirovaniye proyektov v oblasti alternativnoy energetiki i energoeffektivnosti: mezhdunarodnyy opyt i rossiyskiye realii. *Finansy*

*i kredit*. 2013. № 24. S. 12–18. (rus)

7. 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.

8. URL: [www.firstsolar.com](http://www.firstsolar.com)

9. **Ratner S.V.** Sotsialno-ekonomicheskiye efekty razvitiya alternativnoy energetiki v SShA. *Natsionalnyye interesy: priority i bezopasnost*. 2012. № 28. S. 47–55. (rus)

10. First Solar. Annual Report – 2013. Tempe (AZ), USA. 2012, p. 178.

11. **Hinloopen J.** More on Subsidizing Cooperative and Noncooperative R&D in Duopoly with Spillovers. *Journal of Economics*, 2000, no. 72(3), pp. 295–308.

12. **Suzumura K.** Cooperative and Noncooperative R&D in an Oligopoly with Spillovers. *American Economic Review*, 1992, no. 82(5), pp. 1307–1320.

13. **Voronina L.A., Ratner S.V.** Nauchno-innovatsionnyye seti v Rossii: opyt problemy, perspektivy. M.: Infra-M, 2010. 254 s. (Nauchnaya mysl). (rus)

---

**РАТНЕР Светлана Валерьевна** – ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, доктор экономических наук.

117997, ул. Профсоюзная, д. 65, г. Москва, Россия. E-mail: [lanarat@mail.ru](mailto:lanarat@mail.ru)

**RATNER Svetlana V.** – Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences.

117997. Profsoyuznaya str. 65. Moscow. Russia. E-mail: [lanarat@mail.ru](mailto:lanarat@mail.ru)

---