

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

В. А. БАРИНОВА
К. В. ДЕМИДОВА

В статье проведена оценка экономической целесообразности развития солнечной энергетики в городах России с населением свыше 1 млн человек, а также предложено несколько бизнес-моделей, за счет которых солнечная энергетика может быть внедрена в городских условиях. В статье используются метод оценки приведенной стоимости электроэнергии (Levelized Cost of Energy – LCOE) и метод сравнительного анализа, представлен обзор международного опыта применения солнечной энергетики в городах. Проводится анализ экономических и социальных преимуществ развития городских солнечных электростанций.

Согласно результатам исследования, производство солнечной электроэнергии на крышах всех городов-миллионников России может быть экономически выгодным для потребителей электроэнергии на розничных рынках уже сейчас. При этом развитие солнечной энергетики также будет способствовать решению проблемы роста пиковых нагрузок во время волн жары, снижению потребности в кондиционировании зданий, решению проблемы энергодефицита, сокращению выбросов парниковых газов, развитию производства отечественного высокотехнологичного оборудования, повышению привлекательности российских городов.

Статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы государственного задания РАНХиГС при Президенте Российской Федерации.

Ключевые слова: выбросы парниковых газов, возобновляемая энергетика, солнечная энергетика, солнечные электростанции, приведенная стоимость электроэнергии (LCOE), сетевой паритет.

JEL: O13, R1, M2.

Введение

Одной из актуальных тенденций современного регионального управления в мире является развитие городской солнечной энергетики, и эта тема привлекает все большее внимание научного сообщества. При этом одним из популярных направлений исследований стала оценка потенциала размещения солнечных электростанций на крышах зданий в городах, например, с помощью машинного, в том числе глубокого, обучения [14; 28; 36]. В основном оценивание потенциала фотовольтаики на крышах проводится для крупных городов, однако иногда исследователи посвящают свои работы небольшим населенным пунктам, например городским агломерациям островных государств [34]. Подобные оценки способны помочь городским властям проводить более обоснованную политику в области возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и устойчи-

вого развития и в большей степени использовать доступный им потенциал ВИЭ.

Потенциал солнечной энергетики на крышах зданий может быть гигантским. Например, в США, согласно оценкам Национальной лаборатории ВИЭ (NREL), на крышах может производиться до 40% всей электроэнергии [20]. По оценкам Международного энергетического агентства (МЭА), во всем мире число домохозяйств, которые самостоятельно производят потребляемое ими электричество за счет домашних солнечных электростанций (СЭС) на крышах, увеличится с 25 млн в 2022 г. до 100 млн к 2030 г. [11]. Более того, согласно выводам МЭА, для полной декарбонизации электроэнергетического сектора солнечные панели должны быть установлены везде, где есть такая возможность, начиная со зданий [11].

Городская солнечная энергетика уже давно является частью реальных практических

Баринаова Вера Александровна, заведующий международной лабораторией исследований проблем устойчивого развития РАНХиГС при Президенте Российской Федерации; заведующий лабораторией инновационной экономики Института экономической политики имени Е.Т. Гайдара, канд. экон. наук (Москва), e-mail: barinova-va@ranepa.ru; Демидова Ксения Викторовна, стажёр РАНХиГС при Президенте Российской Федерации (Москва), e-mail: demidova-kv@ranepa.ru

решений — например, по данным REN21, в 2021 г. более 1300 городов мира достигали цели или реализовывали политику поддержки ВИЭ. В таких городах проживали более 1 млрд человек, или около 25% всего глобального городского населения [30]. Вместе с тем подавляющее большинство городов не могут производить всю необходимую им электроэнергию самостоятельно ввиду ограниченности имеющейся у них территории. Например, солнечные панели на крыше высотной башни могут обеспечить лишь часть потребностей здания в электроэнергии. Большие ветропарки не могут располагаться в городах, поскольку им требуется открытое пространство. Небольшие ветрогенераторы теоретически могут применяться в городах, однако они недостаточно эффективны и не способны в полной мере обеспечить потребности городских зданий в электроэнергии. Таким образом, городам часто приходится рассчитывать на соседние муниципалитеты в вопросах поставки определенной части необходимой им возобновляемой электроэнергии.

В России городская возобновляемая энергетика пока находится на самых начальных этапах развития. По этой причине в нашем исследовании оценивается экономическая целесообразность размещения солнечных электростанций на крышах крупнейших городов России как наиболее распространенного городского решения ВИЭ. Для этого рассчитывается приведенная стоимость электроэнергии (*Levelized Cost of Energy* — *LCOE*) от СЭС в городах-миллионниках с последующим сравнением полученных оценок с тарифами на сетевую электроэнергию для юридических лиц. Также приводятся примеры бизнес-моделей, с помощью которых в крупных российских городах могут быть реализованы масштабные проекты фотовольтаики на крышах зданий. Результаты оценивания потенциала городской солнечной энергетики при этом могут стать перспективным направлением для последующих исследований.

Развитие солнечной энергетики на крышах зданий в некоторых странах

Глобальным лидером солнечной фотовольтаики на крышах зданий является Китай: в 2022 г. в стране были построены новые солнечные электростанции мощностью 87 ГВт, в основном (две трети, или мощностью 55 ГВт) на крышах зданий [19]. Всего в мире в 2022 г. были построены СЭС мощностью 192 ГВт [33]. Таким образом, приблизительно каждая четвертая установленная в 2022 г. в мире солнечная панель была установлена на крыше китайского здания.

Китайские солнечные электростанции часто располагаются на крышах общественных зданий, таких как больницы или школы, и на крышах промышленных и коммерческих организаций, а их мощность чаще всего составляет 100–200 кВт. Строительство таких электростанций поддерживается государством. В частности, с 2021 г. в Китае действует государственная программа «Солнечная энергия на крышах зданий во всем округе» (*Whole-County Rooftop Solar*), рассчитанная на три года, за которые планируется покрыть солнечными панелями 20–30% площади крыш. В рамках этой программы отдельные небольшие проекты строительства СЭС на крышах объединяются в крупные пулы для сокращения затрат (например, за счет оптовых закупок оборудования). При этом используются две бизнес-модели: владельцы крыш могут профинансировать установку и обслуживание СЭС и в дальнейшем выступать в роли продавца солнечной электроэнергии девелоперу проекта СЭС, либо девелопер проекта может профинансировать установку и обслуживание СЭС и взять в аренду крыши у собственников помещения в обмен на электроэнергию со скидкой. В качестве девелоперов проектов СЭС выступают крупные, часто государственные, компании, которые налаживают партнерство с небольшими локальными девелоперами и поручают последним задачу по поиску владельцев зданий, которые желают разместить

солнечные панели на своих крышах, а также работу по администрированию отдельных небольших проектов [17; 32].

В Индии, согласно имеющимся экспертным оценкам, фотовольтаика на крышах развивается недостаточно быстро [21]: к декабрю 2022 г. на крышах зданий во всей стране были установлены СЭС мощностью 8,8 ГВт, что существенно ниже ранее установленного целевого показателя в 40 ГВт. В 2022 г. в Индии были установлены на крышах новые СЭС мощностью 1,6 ГВт [37]. Однако некоторые индийские города намерены кардинально изменить ситуацию – например, администрация города Индаур с населением около 2 млн человек объявила о планах сделать Индаур «солнечным городом» за счет массовой установки солнечных электростанций на крышах зданий общей мощностью 300 МВт в течение ближайших трех лет. В этих целях планируется выделить государственные субсидии. В первую очередь СЭС будут устанавливаться на крышах государственных зданий. Согласно приблизительным оценкам, для нужд солнечной энергетики в городе может быть использовано 20% площади всех крыш [27]. Кроме того, в стране имеется Национальный портал фотовольтаики на крышах зданий, на котором содержится большой объем информации на данную тему, включая информацию о доступных возможностях заемного финансирования и субсидиях [25].

Солнечная энергетика на крышах зданий также активно развивается и поддерживается государством в некоторых странах постсоветского пространства, например в Узбекистане. В феврале 2023 г. было опубликовано Постановление Президента Узбекистана № ПП-57 «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году»¹, согласно которому с 1 апреля 2023 г. в стране внедряется программа «Зеленый дом». В рамках этой программы поддерживается установка солнечных

электростанций мощностью до 50 кВт в частных домохозяйствах. Физические лица могут поставлять излишки своей солнечной генерации в сеть и получать за это оплату в размере 1 тыс. сумов/кВтч, что эквивалентно 7 руб./кВтч. До конца 2023 г. частные домохозяйства установят около 37 тыс. солнечных электростанций. Кроме того, солнечная энергетика в Узбекистане получит развитие на крышах новых многоквартирных домов – до 50% их площади будет использоваться под СЭС. Помимо этого в Узбекистане создана новая компания «Яшил энергия» («Зеленая энергия») для установки солнечных электростанций на крышах социальных объектов, органов государственной власти и других организаций. До конца 2023 г. компания установит около 20 тыс. СЭС. «Яшил энергия» будет использовать крыши на безвозмездной основе и строить на них СЭС за свой счет. Одна из целей нововведений – экономия природного газа.

Методика оценки стоимости производства солнечной электроэнергии

В современных научных [12; 13; 26; 29] и прикладных [16; 23; 31] исследованиях стоимость производства электроэнергии за счет ископаемого топлива, так и возобновляемых источников энергии принято оценивать с помощью показателя приведенной стоимости электроэнергии (*Levelized Cost of Energy – LCOE*). Данный показатель учитывает все затраты на производство электроэнергии, понесенные на протяжении жизненного цикла электростанции, и представляет собой среднюю расчетную стоимость производства единицы электроэнергии – 1 кВтч, или 1 МВтч. *LCOE* может использоваться для сравнения привлекательности различных технологий производства электроэнергии при условии, что все электростанции, которые подлежат сравнению, являются планируемыми (т.е. их капитальные вложения еще не окупались и не начали оку-

¹ Постановление Президента Республики Узбекистан от 16 февраля 2023 г. «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году». URL: https://www.uza.uz/ru/posts/postanovlenie-prezidenta-respubliki-uzbekistan_455014

паться). *LCOE* также можно рассматривать как минимальную цену, по которой необходимо продавать электроэнергию, чтобы электростанция окупилась в течение срока своей эксплуатации.

LCOE рассчитывается по следующей формуле:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{CAPEX_t + OPEX_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t(1-d)^{t-1}}{(1+r)^t}},$$

где $CAPEX_t$ – капитальные затраты (стоимость оборудования и опор – в случае солнечных электростанций, а также стоимость монтажа оборудования), осуществленные в году t , руб./кВт; $OPEX_t$ – операционные затраты (стоимость обслуживания электростанции) в году t , руб./кВт; F_t – расходы на топливо в году t , являющиеся нулевыми для солнечных электростанций; E_t – объем производства электроэнергии в первый год работы электростанции, кВтч/кВт; d – коэффициент деградации электростанции (сокращение выработки электроэнергии, связанное с износом оборудования), в % в год; r – ставка дисконтирования, в %; n – срок эксплуатации электростанции, лет.

Выбранная методика исследования не является безупречной. Например, показатель *LCOE* не учитывает тот факт, что солнечная генерация является переменной, т.е. солнечные электростанции не могут производить электроэнергию в любой момент, когда она нужна потребителям, а могут делать это лишь в светлое время суток и объем их выработки зависит от инсоляции. Соответственно, в энергосистеме постоянно должны присутствовать другие (гибкие) источники энергии, которые способны оперативно подстраиваться под переменную солнечную генерацию, и их установка или внедрение иных мер, направленных на повышение гибкости системы (например, управление спросом на электроэнергию), может вызывать дополнительные издержки [24; 35]. Однако, если доля переменной выработки не превышает

нескольких процентов (а мы предполагаем, что доля солнечной генерации на крышах в российских городах не скоро превысит несколько процентов от совокупного объема производства электроэнергии), принятие специальных мер, направленных на повышение гибкости системы, может не понадобиться. Кроме того, методика *LCOE* наиболее проста и широко апробирована – в отличие от многочисленных альтернативных методик, пока не получивших большого распространения и признания в мировой научной и практической литературе.

Для понимания экономической целесообразности размещения солнечных электростанций на крышах крупнейших городов России в данном исследовании полученные значения *LCOE* сравниваются с минимальной стоимостью сетевой электроэнергии для юридических лиц. То есть авторы выясняют, достигли ли солнечные электростанции на крышах в каждом из российских городов-миллионников сетевого паритета – ситуации, когда приведенная стоимость электроэнергии, получаемой от ВИЭ, равна или меньше цены сетевой электроэнергии.

Если текущая стоимость сетевой электроэнергии превышает значение *LCOE* для солнечной электростанции, инвестиции организации в собственную солнечную электростанцию окупятся с прибылью, особенно учитывая, что стоимость сетевой электроэнергии обычно постоянно повышается, как минимум, приблизительно на темпы инфляции. Стоимость солнечной электроэнергии при этом практически лишена инфляционной составляющей, так как капитальные затраты осуществляются только на этапе строительства, расходы на топливо отсутствуют, а удельные операционные расходы чрезвычайно малы в сравнении с тепловыми электростанциями.

Предпосылки и результаты оценки

По данным Всероссийской переписи населения, проведенной Росстатом в 2020 г., в России сейчас насчитывается 16 городов с численностью населения более 1 млн человек:

Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Екатеринбург, Казань, Нижний Новгород, Челябинск, Красноярск, Самара, Уфа, Ростов-на-Дону, Омск, Краснодар, Воронеж, Волгоград, Пермь [3]. Большинство этих городов находятся на юге Европейской части страны или на юге Сибири, а также в средней полосе Европейской части, т.е. в регионах, для которых характерны достаточно высокие показатели инсоляции. Для выполнения расчетов данные о выработке типовой солнечной электростанции для каждого исследованного города были взяты в Глобальном солнечном атласе [22]. Также была учтена деградация СЭС (ежегодное снижение выработки, связанное с постепенным износом оборудования) — 0,6% в год.

По данным участников российской отрасли солнечной энергетики, опрошенных в ходе подготовки настоящей статьи, минимальная стоимость солнечной электростанции с установленной мощностью в несколько сотен киловатт или оборудования, купленного оптом, для большого числа СЭС с удельными мощностями 100–200 кВт каждая, с учетом стоимости опор и монтажа, составляет 55 тыс. руб./кВт. Операционные затраты для СЭС с установленной мощностью в несколько сотен киловатт при этом оценивались в 0,35–0,40 тыс. руб. в год на 1 кВт установленной мощности при условии, что СЭС находится в радиусе менее 100 км для подрядчика. В данной статье операционные затраты принимаются равными 0,5 тыс. руб. в год на 1 кВт, поскольку они могут быть немного более высокими для менее крупных станций. Ставка дисконтирования принимается равной 10% — это существенно выше, чем во многих странах мира. При этом мы предполагаем, что половина капитала представляет собой акционерный капитал с доходностью 10%, а вторая половина — заемный капитал с доходностью 10%. Срок эксплуатации СЭС, как и в большинстве других аналогичных исследований, принимается равным 25 годам.

Как следует из результатов расчетов (см. таблицу), во всех российских городах с населением свыше 1 млн человек производство

солнечной электроэнергии является экономически выгодным для организаций: расходы на производство одного киловатт-часа здесь ниже, чем стоимость сетевой электроэнергии. И при снижении стоимости капитала экономика может быть существенно улучшена — это можно сделать, например, за счет льготного финансирования. Теоретически ставки льготного кредитования могут быть очень низкими — от 3% годовых. Например, процентная ставка по льготным кредитам на инвестиционные цели и пополнение оборотных средств для малых и средних предприятий, выпускающих высокотехнологичную продукцию, составляет 3% годовых [4]. При такой ставке и при условии сохранения прочих предпосылок (соотношение собственных и заемных средств 1:1) ставка дисконтирования составит 6,5% годовых.

Из представленных результатов расчетов также видно, что собственная солнечная электроэнергия и так уже является гораздо более дешевой для организаций, чем сетевая электроэнергия, во всех 16 городах-миллионниках России. Для организаций в Москве собственная солнечная электроэнергия может обходиться дешевле сетевой на сумму до 2,2 руб./кВт·ч, или до 28%, в Санкт-Петербурге — до 2,9 руб./кВт·ч, или до 33%, в Ростове-на-Дону — до 5,2 руб./кВт·ч, или до 52%, в Краснодаре и Волгограде — до более чем 7 руб./кВт·ч, или до 60%. При этом стоимость производства солнечной электроэнергии чувствительна к ставке дисконтирования: при условии льготного кредитования возможна еще более существенная экономическая выгода от использования собственной солнечной электроэнергии, особенно в Краснодаре и Волгограде, где производство собственной солнечной электроэнергии может обходиться дешевле, чем покупка электроэнергии из сети, до более чем 8 руб./кВт·ч, или до 68%. (Для большей наглядности результаты расчетов также приведены на рисунке.)

Помимо этого, ускорить окупаемость солнечных электростанций может поставка излишков солнечной генерации в сеть по закону

Стоимость производства солнечной электроэнергии в городах-миллионниках России по сравнению со стоимостью сетевой электроэнергии для организаций

Город	Численность населения, млн человек	Минимальная стоимость производства солнечной электроэнергии, руб./кВт·ч		Минимальная стоимость сетевой электроэнергии (с НДС), руб./кВт·ч*		Максимальная экономия, в %	
		Обычная ставка дисконтирования (10%)	Льготная ставка дисконтирования (6,5%)	Для ИП** и МП**	Для СП***	При обычной ставке дисконтирования (10%)	При льготной ставке дисконтирования (6,5%)
Москва	13,0	5,66	4,48	7,9	6,4	28	43
Санкт-Петербург	5,6	5,98	4,73	8,9	8,2	33	47
Новосибирск	1,6	5,35	4,23	6,8	6,4	21	38
Екатеринбург	1,6	5,56	4,39	9,1	8	39	52
Казань	1,3	5,65	4,47	8,4	7,6	33	47
Нижний Новгород	1,3	5,72	4,52	9,6	8,6	40	53
Челябинск	1,2	5,33	4,21	8,5	8,3	37	50
Красноярск	1,2	5,25	4,15	9,7	6,6	46	57
Самара	1,2	5,17	4,09	11,2	9,2	54	63
Уфа	1,1	5,57	4,41	7,6	6,8	27	42
Ростов-на-Дону	1,1	4,85	3,84	10	8,9	52	62
Омск	1,1	5,34	4,22	7,6	6	30	44
Краснодар	1,1	4,72	3,73	11,8	10,1	60	68
Воронеж	1,1	5,31	4,20	10,3	8,3	48	59
Волгоград	1,0	4,80	3,80	12	9,7	60	68
Пермь	1,0	5,99	4,73	8,8	7,2	32	46

* – Минимальная стоимость сетевой электроэнергии приведена по состоянию на апрель 2023 г.

** – Для потребителей с максимальной мощностью энергообъектов – предприятия менее 670 кВт, подключенные к сетям по уровню напряжения НН (0,4 кВ), которые часто являются индивидуальными предпринимателями (ИП) и малыми предприятиями (МП).

*** – Для потребителей с максимальной мощностью энергообъектов – предприятия менее 670 кВт, подключенные к сетям по уровню напряжения СН-2 (20-1 кВ), которые часто являются средними предприятиями (СП).

Источник: расчеты авторов, [3; 9].

о микрогенерации. В настоящее время физические и юридические лица могут получать компенсацию за поставленные в сеть излишки солнечной электроэнергии в размере более 5 руб./кВт·ч [5; 7]. При этом максимальная мощность выдачи излишков в сеть ограничена 15 кВт как для физических, так и для юридических лиц. Для физических лиц такое ограничение оправданно, поскольку установленная мощность их СЭС обычно не превышает 15 кВт, а для юридических лиц оно является слишком низким – на практике мощность СЭС индивидуальных предпринимателей и юридических лиц нередко составляет более 100 кВт, а иногда доходит до нескольких сотен киловатт.

Бизнес-модели для внедрения фотовольтаики на крышах зданий в городах

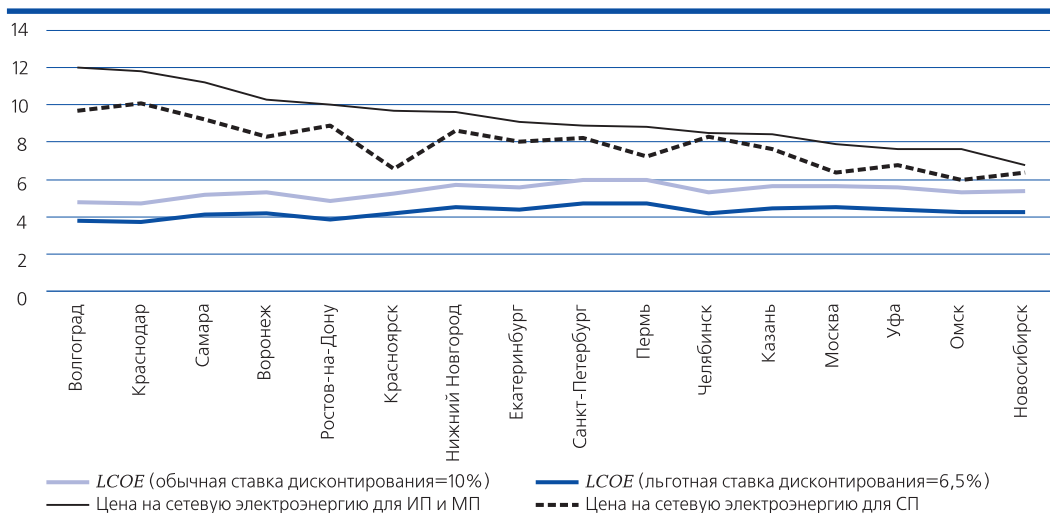
Производство солнечной электроэнергии в городах-миллионниках, как и в любых других городах, может осуществляться путем использования трех приводимых ниже инструментов.

При этом в каждом случае рекомендуется агрегировать отдельные небольшие проекты в большие пулы в целях экономии (например, для закупки оборудования оптом по более низким ценам, чем в розницу, а также для обслуживания объектов у одного подрядчика со скидкой).

1. Производство солнечной электроэнергии генерирующими компаниями

В данном случае в качестве инвесторов и генераторов могут выступить как компании, которые уже специализируются на установке и обслуживании солнечных электростанций, так и компании, имеющие опыт лишь традиционной (в частности, тепловой) генерации. Вторые могут организовать сотрудничество с первыми. Владельцы крыш (муниципальные и государственные организации) предоставляют свои крыши за арендную плату или в обмен на скидку на оплату электроэнергии. Такой механизм может быть реализован через поддержку ВИЭ на розничных рынках электроэнергии²

Стоимость производства солнечной электроэнергии в городах-миллионниках России по сравнению со стоимостью сетевой электроэнергии для организаций, руб./кВт·ч



Источник: расчеты авторов, [9].

² Постановление Правительства РФ от 23 января 2015 г. № 47 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам стимулирования использования возобновляемых источников энергии на розничных рынках электрической энергии».

или через Закон о микрогенерации³. В случае его реализации через розничные рынки электроэнергии отдельные небольшие проекты следует собрать в пулы совокупной мощностью от 1–2 до 25 МВт (установленная мощность СЭС на розничных рынках ограничена 25 МВт), а затем выставить их на региональные отборы проектов ВИЭ. Победителями отборов станут проекты с минимальной стоимостью электроэнергии; для них будет назначен специальный тариф, по которому они будут поставлять электроэнергию в сеть. В случае реализации данной бизнес-модели через микрогенерацию девелопер проекта поставляет произведенную солнечную электроэнергию в первую очередь владельцам крыш – муниципальным и городским организациям по более низким ценам, чем розничный тариф, при этом излишки солнечной генерации направляются в сеть.

2. Производство солнечной электроэнергии муниципальными и государственными организациями

В данной бизнес-модели в качестве девелоперов предлагаются владельцы крыш – муниципальные организации или непосредственно городские администрации. Они финансируют СЭС, производят солнечную электроэнергию преимущественно для собственных нужд (по более низким ценам, чем тариф на сетевую электроэнергию), а излишки продают энергосбытовым компаниям в рамках Закона о микрогенерации. Для финансирования такой бизнес-модели могут использоваться не только льготные кредиты, но и, например, зеленые облигации городских администраций, выпущенные, в том числе, для физических лиц.

3. Производство солнечной электроэнергии энергетическими кооперативами

Для данной бизнес-модели в каждом городе создается один или несколько энергетических кооперативов, которые становятся инвесто-

рами и генераторами солнечной электроэнергии. Городские администрации или их структуры при этом могут выступить в качестве фасилитаторов создания таких кооперативов – например, в целях быстрого формирования их благоприятной репутации, в целях привлечения крупных партнеров (например, поставщиков оборудования), дешевого финансирования (например, через выпуск зеленых облигаций) и т.д. Установку и обслуживание СЭС осуществляют специализирующиеся на этом солнечные генерирующие компании. СЭС на крышах используются прежде всего для снабжения электроэнергией членов кооперативов (по более низким ценам, чем тариф на сетевую электроэнергию), а излишки генерации поставляются в сеть по Закону о микрогенерации.

Важно отметить, что, кроме традиционных солнечных панелей на крышах, в российских городах возможно применение фасадных солнечных модулей [8], которые могут улучшить эстетический вид зданий и внести разнообразие в городской пейзаж. В России уже производятся модули, соответствующие требованиям строительных, санитарных, пожарных, экологических, а также других норм безопасности, утвержденных действующим российским законодательством [8].

Для сокращения отставания России от соседних стран, таких как Китай и Узбекистан, в области солнечной энергетики рекомендуется реализация следующих действий: с 2024 г. на крышах всех муниципальных и государственных зданий в российских городах-миллионниках должны устанавливаться фотоэлектрические станции, покрывающие не менее 30% пригодной для использования площади крыш; в крупнейших российских городах необходимо провести работу по облегчению внедрения фотовольтаики на крышах многоквартирных домов, которое в настоящий момент является затрудненным, с последующей популяризацией данного решения.

³ Федеральный закон № 471-ФЗ от 11 декабря 2019 г. «О внесении изменений в Федеральный закон "Об электроэнергетике" в части развития микрогенерации».

Положительные эффекты от развития городской фотовольтаики

До сих пор в статье мы уделяли внимание исключительно экономическому эффекту от установки солнечных электростанций на крышах в городах — в частности, было выявлено, что во всех российских городах-миллионниках солнечная электроэнергия уже достигла сетевого паритета. Однако это далеко не единственный позитивный результат развития фотовольтаики на крышах в городах России.

Помимо получения более дешевой электроэнергии за счет СЭС (в сравнении с сетевой электроэнергией), развитие фотовольтаики на крышах будет способствовать решению следующих проблем:

1. Ослабление негативного влияния волн тепла на энергосистему. В последние годы в России наблюдается повышение летних температур воздуха, в связи с чем в дальнейшем возможно возникновение ситуаций нехватки электроэнергетических мощностей.

Тенденция к повышению летней нагрузки на энергосистемы в первую очередь связана с увеличением потребления электроэнергии для вентиляции и кондиционирования. В самой крупной южной энергосистеме — Кубанской — в 2014 г. впервые годовой максимум потребления электроэнергии пришелся не на зимний, а на летний период, и с тех пор ситуация не менялась. В Московской энергосистеме заметно формирование локального максимума потребления электроэнергии в летний период, который растет на 30% быстрее, чем «традиционный» зимний максимум. Важнейшую роль в производстве электроэнергии в России играют тепловые и атомные электростанции (ТЭС и АЭС), показатели работы которых (мощность, коэффициент полезного действия) существенно ухудшаются в жаркую погоду. При дальнейшем росте летних температур возможно возникновение ситуаций, в которых ТЭС и АЭС придется временно останавливать [1; 2]. В таких условиях для поддержания стабильности энергетических систем необходимо использование источников энергии, не

имеющих рисков частичного или полного прекращения работы в жаркую погоду. Примером таких источников являются солнечные электростанции, применение которых в городах могло бы стать адаптационной мерой, способствующей безаварийной и эффективной работе тепловых и атомных электростанций.

2. Охлаждение городских крыш и снижение потребности в кондиционировании. Солнечные панели создают на крышах зданий постоянную тень, поглощают часть поступающей на их поверхность энергии, преобразуя ее в электроэнергию, а также отражают часть энергии, поступающей на их поверхность. В результате в помещениях может наблюдаться снижение спроса на кондиционирование [19].

3. Сокращение энергодефицита в регионах, где это является проблемой (т.е. в регионах, в которые невозможно поставлять достаточные объемы электроэнергии из других регионов), — например, в г. Краснодаре [10].

4. Снижение выбросов парниковых газов. Города являются источником больших объемов выбросов парниковых газов. Во всем мире дополнительные выбросы парниковых газов, связанные с повышенным спросом на кондиционирование из-за экстремально высоких температур, в 2022 г. составили около 40 млн т CO₂-экв. [15]. Некоторые российские города уже входят в число лидеров по объемам выбросов парниковых газов на мировом уровне — например, в 2021 г. Москва вошла в топ-25 таких городов [6]. Тогда как при производстве электроэнергии на солнечных электростанциях выбросы парниковых газов отсутствуют.

5. Поддержка и стимулирование развития отечественного производства высокотехнологичного оборудования для СЭС (в частности, кремниевых пластин и модулей). При этом программу установки СЭС на крышах не следует закрывать для иностранных производителей оборудования, чтобы не ограничивать конкуренцию и не завышать цены на российское оборудование.

6. Распространение современной и объективной информации о возобновляемой энер-

гетике и стимулирование экономного отношения к природным ресурсам в государственных учреждениях, детских садах, школах и университетах.

Выводы и рекомендации

Проведенные расчеты показали, что производство солнечной электроэнергии на крышах всех городов-миллионников России уже сейчас может быть экономически выгодным для организаций, которые потребляют электроэнергию на розничных рынках. Московские организации могут получать собственную солнечную электроэнергию до 28% дешевле, чем электроэнергию из сети, петербургские – до 33%, ростовские – до 52%, а краснодарские и волгоградские – до 60%. Если ввести льготное кредитование установки солнечных панелей на крышах крупнейших городов с процентной ставкой 3% годовых, то экономия на собственной генерации в Краснодаре и Волгограде может достигать до 68%. Кроме того, ускорить окупаемость солнечных электростанций поможет поставка излишков солнечной генерации в сеть по Закону о микрогенерации. Уже сейчас стоимость таких излишков может составлять более 5 руб./кВтч.

По мнению авторов статьи, в крупнейших российских городах необходимо оказать поддержку становлению процесса солнечной генерации на крышах по следующим причинам:

- развитие передовых практик, широко применяемых в соседних странах, а также формирование предпосылок для сотрудничества с ними по данному направлению;
- популяризация возобновляемой энергетики и бережного отношения к природным ресурсам в государственных учреждениях, детских садах, школах и университетах;
- поддержка наиболее уязвимых участников экономики – индивидуальных предпринимателей, малого и среднего бизнеса.

В качестве мер поддержки развития солнечной генерации на крышах российских городов предлагается создание и внедрение

программы солнечных электростанций на крышах муниципальных зданий – по примеру Китая и Узбекистана. Такая программа должна установить долю свободной площади крыш муниципальных зданий (например, 30%), которая должна быть занята солнечными панелями, начиная с определенного года (например, с 2024-го), а также назначить ответственных за достижение поставленных целей (например, Минэнерго России) и определить механизмы реализации программы. Кроме того, рекомендуется разработать и внедрить программу льготного кредитования по ставке 3% годовых для установки солнечных электростанций на крышах в городах России. Также для индивидуальных предпринимателей и юридических лиц необходимо повысить максимальную мощность передачи излишков ВИЭ-генерации в сеть с текущих 15 до 150 кВт.

Для реализации программы «солнечных крыш» в российских городах-миллионниках предлагается задействовать один из следующих механизмов или их комбинацию:

1. Производство солнечной электроэнергии генерирующими компаниями (девелоперы проектов – генерирующие компании, муниципальные организации предоставляют свои крыши за арендную плату или за скидку на оплату электроэнергии).

2. Производство солнечной электроэнергии муниципальными и государственными организациями (девелоперы проектов – муниципальные и государственные организации, которые используют собственные крыши для генерации солнечной электроэнергии).

3. Производство солнечной электроэнергии энергетическими кооперативами (девелоперы проектов – энергетические кооперативы, муниципальные организации предоставляют свои крыши за арендную плату или за скидку на оплату электроэнергии).

Все перечисленные меры позволят добиться экономии расходов муниципальных и государственных организаций на оплату электроэнергии, решения проблемы роста пиковых нагрузок во время волн жары, охлажде-

ния городских крыш и снижения потребности в кондиционировании, решения проблемы энергодефицита, сокращения выбросов парниковых газов, стимулирования производства отечественного высокотехнологичного оборудования для ЭЭС, а также развития современного образа городов России. Кроме того, можно ожидать роста привлекательности солнечной энергетики в России, формирования лучших практик в этой области, а также укрепления сотрудничества с соседними странами по данному направлению.

В развитие данного исследования планируется провести оценку потенциала размещения солнечных электростанций на крышах зданий в городах. В настоящей статье такая оценка не являлась предметом исследования, однако она необходима для понимания дисбалансов, которые могут появиться в случае интеграции объемов переменной возобновляемой электроэнергии в сеть, превышающих несколько процентов от общей генерации, а также для понимания возможностей российских городов в сфере перехода на ВИЭ. ■

Литература

1. Акентьева Е.М., Ключева М.В., Фасолько Д.В. Влияние наблюдаемых изменений климата на энергетическую отрасль (на примере Псковской, Смоленской и Брянской областей) // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. № 595. С. 7–21.
2. Клименко В.В., Гинзбург А.С., Федотова Е.В., Терешин А.Г. Волны тепла — новая опасность для энергосистемы России // Доклады Российской академии наук. Сер.: Физика, технические науки. 2020. Т. 494. № 1. С. 82–88.
3. Итоги Всероссийской переписи населения 2020 года / Росстат. URL: <https://rosstat.gov.ru/vpn/2020>
4. Льготные кредиты под 3% для инновационных компаний // Мой Бизнес. URL: <https://мойбизнес.рф/anticrisis/lgotnye-kredity-pod-3-dlya-innovatsionnykh-kompaniy/>
5. Микрогенерация / Хевел. URL: <https://www.hevelsolar.com/mikrogeneraciya/>
6. Москва вошла в топ-25 городов по выбросам парниковых газов // Коммерсантъ. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4899029>
7. Объем и средневзвешенная цена покупки на розничном рынке электрической энергии, выработанной на объектах микрогенерации / АО «Мосэнергосбыт». URL: <https://www.mosenergosbyt.ru/common/about/subject/purchase-volume.php>
8. Фотоэлектрические фасадные системы / Хевел. URL: <https://www.hevelsolar.com/facade/>
9. Цены на электроэнергию для бизнеса в РФ / Time2Save. URL: <https://time2save.ru/>
10. Юдин Ю. Новое планирование // Энергия без границ. 2022. № 4 (75). С. 14–17.
11. Approximately 100 million households rely on rooftop solar PV by 2030 / IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/approximately-100-million-households-rely-on-rooftop-solar-pv-by-2030>
12. Barbyn A. et al. Optimal design and cost analysis of single-axis tracking photovoltaic power plants // Renewable Energy. 2023. Vol. 211. Pp. 626–646.
13. Branker K., Pathak M.J.M., Pearce J.M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. Vol. 15. No. 9. Pp. 4470–4482.
14. Castello R. et al. Quantification of the suitable rooftop area for solar panel installation from overhead imagery using Convolutional Neural Networks // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2042. No. 1. Pp. 1–6.
15. CO₂ emission in 2022 / IEA. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/3c8fa115-35c4-4474-b237-1b00424c8844/CO2Emissionsin2022.pdf>
16. Cost of New Renewables Temporarily Rises as Inflation Starts to Bite / BNEF. URL: <https://about.bnef.com/blog/cost-of-new-renewables-temporarily-rises-as-inflation-starts-to-bite/>
17. Ding L., Murtaugh D. China Takes Its Climate Fight to the Rooftops / Bloomberg. URL: <https://www.bloomberg.com/news/features/2023-03-27/why-china-rooftop-solar-power-leads-world-on-clean-energy-capacity#xj4y7vzkg>
18. Dominguez A., Kleissl J., Luvall J.C. Effects of solar photovoltaic panels on roof heat transfer // Solar Energy. 2011. Vol. 85. No. 9. Pp. 1–32.
19. Fishman D. A boots-on-the-rooftop view of China's solar photovoltaic boom / The China Project. URL: <https://thechinaproject.com/2023/02/20/a-boots-on-the-rooftop-view-of-chinas-solar-photovoltaic-boom/>

20. Gagnon P., Margolis R., Melius J., Phillips C., Elmore R. Rooftop solar photovoltaic technical potential in the United States: A detailed assessment / NREL Tech. Rep. URL: www.nrel.gov/docs/fy16osti/65298.pdf
21. Global Market Outlook for Solar Power 2023–2027. Focus on Southeast Asia / SolarPower Europe. URL: https://api.solarpowereurope.org/uploads/1023_SPE_GMO_2023_report_08_mr_a66b26fe68.pdf?updated_at=2023-06-12T09:04:12.857Z
22. Global Solar Atlas. URL: <https://globalsolaratlas.info/map>
23. Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis-Version 16.0 / Lazard. URL: <https://www.lazard.com/media/typdgxmm/lazards-lcoeplus-april-2023.pdf>
24. Loth E., Qin C., Simpson J.G., Dykes K. Why we must move beyond LCOE for renewable energy design // *Advances in Applied Energy*. 2022. Vol. 8. Pp. 1–10.
25. National Portal for Rooftop Solar / Ministry of New and Renewable Energy of India. URL: <https://solarrooftop.gov.in/>
26. Nieto-Diaz B.A., Crossland A.F., Groves C. A levelized cost of energy approach to select and optimise emerging PV technologies: The relative impact of degradation, cost and initial efficiency // *Applied Energy*. 2021. Vol. 299. Pp. 1–49.
27. Plan to transform Indore into 'Solar City', generate 300 MW rooftop energy / *Energy World*. URL: <https://energy.economictimes.indiatimes.com/news/renewable/plan-to-transform-indore-into-solar-city-generate-300-mw-rooftop-energy/99972998>
28. Prakash P.S., Aithal B.H. A Deep Learning Based Approach for Rooftop Solar Potential Estimation of a City: A Case Study of Indian Metropolis. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9553088/authors#authors>
29. Reichelstein S., Yorston M. The prospects for cost competitive solar PV power // *Energy Policy*. 2013. Vol. 55. Pp. 117–127.
30. Renewables in Cities Global Status Report / UN Environment programmer. URL: <https://www.unep.org/resources/report/renewables-cities-2021-global-status-report>
31. Renewable Power Generation Costs in 2021 / IRENA. URL: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>
32. Shah, J. How China Ensured 55 GW of Rooftop Solar In 2022 / *Saur Energy International*. URL: <https://www.saurenergy.com/solar-energy-blog/lessons-for-the-future-an-insight-into-chinas-dominance-in-rooftop-solar-and-indias-road-ahead>
33. Statistics Time Series / IRENA. 2023. URL: <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>
34. Tian A., Zund D., Bettencourt L.M.A. Estimating Rooftop Solar Potential in Urban Environments: A Generalized Approach and Assessment of the Galapagos Islands // *Frontiers in Sustainable Cities*. 2021. Vol. 3. Pp. 1–11.
35. Ueckerdt F., Hirth L., Luderer G., Edenhofer O. System LCOE: What are the costs of variable renewables? // *Energy*. 2013. Vol. 63. Pp. 61–75.
36. Zhong et al. A city-scale estimation of rooftop solar photovoltaic potential based on deep learning // *Applied Energy*. 2021. Vol. 298. Pp. 1–21.
37. 2022 Q4 and annual Mercom India rooftop solar market report – 1.6 GW installed in 2022 / Mercom India Research. URL: <https://www.mercomindia.com/product/rooftop-solar-market-report-q4-2022>

References

1. Akentieva E.M., Klyueva M.V., Fasolko D.V. The impact of observed climate change on the energy industry (on the example of the Pskov, Smolensk and Bryansk regions) // *Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeykov*. 2019. No. 595. Pp. 7–21.
2. Klimenko V.V., Ginzburg A.S., Fedotova E.V., Tereshin A.G. Heat waves are a new threat to the Russian energy system // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Series: Physics, Technical Sciences*. 2020. Vol. 494. No. 1. Pp. 82–88.
3. Results of the All-Russian Population Census of 2020 / Rosstat. URL: <https://rosstat.gov.ru/vpn/2020>
4. Preferential loans at 3% for innovative companies // *Moj Biznes*. URL: <https://xn-90aifddrld7a.xn-p1ai/anticrisis/lgotnye-kredity-pod-3-dlya-innovatsionnykh-kompaniy>
5. Microgeneration / Hevel. URL: <https://www.hevelsolar.com/mikrogeneraciya/>
6. Moscow entered the top 25 cities in terms of greenhouse gas emissions // *Kommersant*. 12.07.2021. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4899029>

7. Volume and weighted average purchase price in the retail market of electricity generated at microgeneration facilities / Mosjenergosbyt. 2023. URL: <https://www.mosenergosbyt.ru/common/about/subject/purchase-volume.php>
8. Photovoltaic facade systems / Hevel. URL: <https://www.hevelsolar.com/facade/>
9. Electricity prices for business in the Russian Federation / Time2Save. 2023. URL: <https://time2save.ru/>
10. Judin J. New planning // Energy without Limits. 2022. No. 4 (75). Pp. 14–17.
11. Approximately 100 million households rely on rooftop solar PV by 2030 / IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/approximately-100-million-households-rely-on-rooftop-solar-pv-by-2030>
12. Barbyn A. et al. Optimal design and cost analysis of single-axis tracking photovoltaic power plants // Renewable Energy. 2023. Vol. 211. Pp. 626–646.
13. Branker K., Pathak M.J.M., Pearce J.M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. Vol. 15. No. 9. Pp. 4470–4482.
14. Castello R. et al. Quantification of the suitable rooftop area for solar panel installation from overhead imagery using Convolutional Neural Networks // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2042. No. 1. Pp. 1–6.
15. CO₂ emission in 2022 / IEA. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/3c8fa115-35c4-4474-b237-1b00424c8844/CO2Emissionsin2022.pdf>
16. Cost of New Renewables Temporarily Rises as Inflation Starts to Bite / BNEF. URL: <https://about.bnef.com/blog/cost-of-new-renewables-temporarily-rises-as-inflation-starts-to-bite/>
17. Ding L., Murtaugh D. China Takes Its Climate Fight to the Rooftops / Bloomberg. URL: <https://www.bloomberg.com/news/features/2023-03-27/why-china-rooftop-solar-power-leads-world-on-clean-energy-capacity#xj4y7vzkg>
18. Dominguez A., Kleissl J., Luvall J.C. Effects of solar photovoltaic panels on roof heat transfer // Solar Energy. 2011. Vol. 85. No. 9. Pp. 1–32.
19. Fishman D. A boots-on-the-rooftop view of China's solar photovoltaic boom / The China Project. URL: <https://thechinaproject.com/2023/02/20/a-boots-on-the-rooftop-view-of-chinas-solar-photovoltaic-boom/>
20. Gagnon P., Margolis R., Melius J., Phillips C., Elmore R. Rooftop solar photovoltaic technical potential in the United States: A detailed assessment / NREL Tech. Rep. URL: www.nrel.gov/docs/fy16osti/65298.pdf
21. Global Market Outlook for Solar Power 2023–2027. Focus on Southeast Asia / SolarPower Europe. URL: https://api.solarpowereurope.org/uploads/1023_SPE_GMO_2023_report_08_mr_a66b26fe68.pdf?updated_at=2023-06-12T09:04:12.857Z
22. Global Solar Atlas. URL: <https://globalsolaratlas.info/map>
23. Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis-Version 16.0 / Lazard. URL: <https://www.lazard.com/media/typdgxmm/lazards-lcoeplus-april-2023.pdf>
24. Loth E., Qin C., Simpson J.G., Dykes K. Why we must move beyond LCOE for renewable energy design // Advances in Applied Energy. 2022. Vol. 8. Pp. 1–10.
25. National Portal for Rooftop Solar / Ministry of New and Renewable Energy of India. URL: <https://solarrooftop.gov.in/>
26. Nieto-Diaz B.A., Crossland A.F., Groves C. A levelized cost of energy approach to select and optimise emerging PV technologies: The relative impact of degradation, cost and initial efficiency // Applied Energy. 2021. Vol. 299. Pp. 1–49.
27. Plan to transform Indore into 'Solar City', generate 300 MW rooftop energy / Energy World. URL: <https://energy.economictimes.indiatimes.com/news/renewable/plan-to-transform-indore-into-solar-city-generate-300-mw-rooftop-energy/99972998>
28. Prakash P.S., Aithal B.H. A Deep Learning Based Approach for Rooftop Solar Potential Estimation of a City: A Case Study of Indian Metropolis. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9553088/authors#authors>
29. Reichelstein S., Yorston M. The prospects for cost competitive solar PV power // Energy Policy. 2013. Vol. 55. Pp. 117–127.
30. Renewables in Cities Global Status Report / UN Environment programme. URL: <https://www.unep.org/resources/report/renewables-cities-2021-global-status-report>
31. Renewable Power Generation Costs in 2021 / IRENA. URL: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>
32. Shah, J. How China Ensured 55 GW of Rooftop Solar In 2022 / Saur Energy International. URL: <https://www.saurenergy.com/solar-energy-blog/lessons-for-the-future-an-insight-into-chinas-dominance-in-rooftop-solar-and-indias-road-ahead>

33. Statistics Time Series / IRENA. 2023. URL: <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>
34. Tian A., Zund D., Bettencourt L.M.A. Estimating Rooftop Solar Potential in Urban Environments: A Generalized Approach and Assessment of the Galapagos Islands // *Frontiers in Sustainable Cities*. 2021. Vol. 3. Pp. 1–11.
35. Ueckerdt F., Hirth L., Luderer G., Edenhofer O. System LCOE: What are the costs of variable renewables? // *Energy*. 2013. Vol. 63. Pp. 61–75.
36. Zhong et al. A city-scale estimation of rooftop solar photovoltaic potential based on deep learning // *Applied Energy*. 2021. Vol. 298. Pp. 1–21.
37. 2022 Q4 and annual Mercom India rooftop solar market report – 1.6 GW installed in 2022 / Mercom India Research. URL: <https://www.mercomindia.com/product/rooftop-solar-market-report-q4-2022>

Economic Feasibility of Solar Energy in Russia

Vera A. Barinova – Head of International Laboratory for Research on Sustainable Development Problems of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration; Head of Laboratory of Innovative Economics of the Gaidar Institute for Economic Policy, Candidate of Economic Sciences (Moscow, Russia). E-mail: barinova-va@ranepa.ru

Kseniya V. Demidova – Intern of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (Moscow, Russia). E-mail: demidova-kv@ranepa.ru

The authors of the article assess the economic feasibility of solar energy in Russian cities with a population of over 1 million people, and also offer several business models through which solar energy can be introduced in urban areas. The article uses the method of assessing the levelized cost of energy (LCOE) and the method of comparative analysis, provides an overview of international experience in the use of solar energy in cities. The authors also analyze the economic and social benefits of developing urban solar power plants.

According to the results of the study, the production of solar electricity on the roofs of all largest cities in Russia can be economically beneficial for electricity consumers in retail markets right now. At the same time, the development of solar energy will also contribute to solving the problem of increasing peak loads during heat waves, reducing the need for air conditioning in buildings, solving the problem of energy shortage, reducing greenhouse gas emissions, developing the production of domestic high-tech equipment, and increasing the attractiveness of Russian cities, especially for young people.

The article was written on the basis of the RANEPА state assignment research programme.

Key words: greenhouse gas emissions, renewable energy, solar energy, solar power plants, levelized cost of electricity (LCOE), grid parity.

JEL-codes: O13, R1, M2.