



DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-278-290

EDN: HWCMEP

УДК 914

Научная статья / Research article

Оценка роли развития гелиоэнергетики как инструмента энергетического перехода в России

Л.В. Нефедова^{ID}✉, Ю.Ю. Рафикова^{ID}*МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация*

✉nefludmila@mail.ru

Аннотация. На основе характеристик современного состояния использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мире и в России рассмотрена роль гелиоэнергетики в решении одной из актуальных проблем развития современного общества – энергоперехода к использованию низкоуглеродных энергоисточников. Оценены и проанализированы и объемы произведенной электроэнергии и снижения выбросов CO₂ на фотоэлектрических станциях, работающих в регионах России на начало 2022 г. Выделены Республика Калмыкия и Алтай, имеющие наибольшие доли солнечной электроэнергии в энергобалансах – 35,7 и 23,2 % соответственно. Рассмотрены проблемы оценки природно-ресурсных рисков использования гелиоресурсов в Российской Федерации в связи с климатическим районированием территории. Авторами предложена методика оценки степени риска использования солнечных ресурсов на основе расчета характеристик изменчивости поступления солнечной радиации на земную поверхность, оценки и картирования уровня природно-ресурсных рисков. Определены уровни ресурсных рисков развития солнечной энергетики для Оренбургской и Астраханской областей, лидеров по развитию гелиоэнергетики в России.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, геоинформационные технологии, гелиоэнергетика, природно-ресурсные риски, эмиссия углекислого газа, энергопереход

Вклад авторов: Л.В. Нефедова – концептуализация, методология, сбор материалов, расчеты; Ю.Ю. Рафикова – геоинформационный анализ, обработка данных.

История статьи: поступила в редакцию 15.09.2022; доработана после рецензирования 20.01.2023; принята к публикации 25.02.2023.

© Нефедова Л.В., Рафикова Ю.Ю., 2023

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Для цитирования: Неведова Л.В., Рафикова Ю.Ю. Оценка роли развития гелио-энергетики как инструмента энергетического перехода в России // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 2. С. 278–290. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-2-278-290>

Assessment of the solar energy development role as a tool for the energy transition in Russia

Liudmila V. Nefedova  , Yulia Yu. Rafikova 

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

 nefludmila@mail.ru

Abstract. Based on the characteristics of the current state of the use of renewable energy sources (RES) in the world and in Russia, the role of solar energy in solving one of the urgent problems of the development of modern society – energy transition to the use of low-carbon energy sources is considered. The volumes of electricity produced and the reduction of CO₂ emissions at photovoltaic stations operating in the regions of Russia at the beginning of 2022 were evaluated and analyzed. The Republic of Kalmykia and Altai were singled out, which have the largest shares of solar electricity in the energy balances, 35.7 and 23.2%, respectively. The problems of assessing the natural resource risks of using solar resources in the Russian Federation in connection with the climatic zoning of the territory are considered. The authors propose a method for assessing the degree of risk of using solar resources based on calculating the characteristics of the variability of solar radiation on the earth's surface, assessing and mapping the level of natural resource risks. The levels of resource risks in the development of solar energy for the Orenburg and Astrakhan regions, leaders in the development of solar energy in Russia, were assessed.

Keywords: renewable energy sources, geoinformation technologies, solar energy, natural resource risks, carbon dioxide emission, energy transition

Authors' contributions: *L.V. Nefedova* – conceptualization, methodology, collection of materials, calculations; *Yu.Yu. Rafikova* – geoinformation analysis, data processing.

Article history: received 15.09.2022; revised 20.02.2023; accepted 25.02.2023.

For citation: Nefedova LV, Rafikova YuYu. Assessment of the solar energy development role as a tool for the energy transition in Russia. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2023;31(2):278–290. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-2-278-290>

Введение

Анализ мировых тенденции показывает, что низкоуглеродное энергопроизводство становится все более актуальным для будущего развития энергетики. Конференция по вопросам изменения климата (COP21), которая состоялась в Париже в 2015 г., а также обеспокоенность общественности вопросами изменения климата свидетельствуют о том, что в долгосрочной перспективе доля ископаемого топлива в структуре мирового топливно-

энергетического баланса будет снижаться. Мировая экономическая система вступает в фазу четвертого энергетического перехода, который и соответствует цели № 7 устойчивого развития, провозглашенного ООН, посвященной развитию энергетического сектора. Целью энергетического перехода заявлена полная углеродная нейтральность к 2050 г. По оценкам экспертов, глобальные выбросы, связанные с энергетикой, в сравнении с уровнем 2019 г. должны к 2030 г. и 2040 г. сократиться на 30 и на 75 % соответственно, чтобы достичь нулевых значений в 2050 г.¹

Глобальные инвестиции в энергетический переход в 2021 г. составили 755 млрд долл. США, что является новым рекордом благодаря растущим климатическим амбициям и политическим действиям стран по всему миру. При этом инвестиции в возобновляемую энергетику (ВЭ) достигли рекордного объема в 366 млрд долл. США, что на 6,5 % больше, чем годом ранее². На начало 2021 г. суммарная мощность солнечных электростанций (СЭС) в мире составляла 501 ГВт, а ветроэнергостанций на суше и на шельфе – около 743 ГВт. На рис. 1 представлено изменение инвестиций в мире в данном секторе экономики с 2004 г. по настоящее время. Необходимо отметить, что с 2014 г. возрастают инвестиции не только в ВЭ, но и в электротранспорт и электроотопительные системы. В последние годы появляются и новые направления инвестиций в энергопереходе: водородные проекты, системы улавливания и хранения CO₂, атомные электростанции (ЭС) (которые были включены в сектор безуглеродной энергетики).

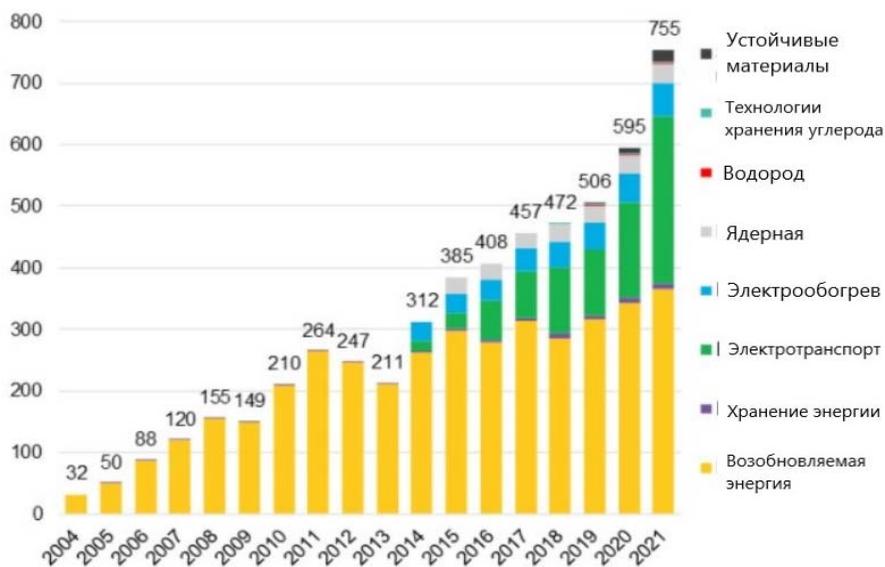


Рис. 1. Рост мировых инвестиции в энергетический переход в 2004–2021 гг., млрд долл. США
 Источник: Energy transition investment trends. Bloombergnef (BNEF), 2022. P. 21.

¹ Пути перехода к устойчивой энергетике. Ускорение энергетического перехода в регионе. Серия публикаций ЕЭК ООН по энергетике. № 67, Женева: ЕЭК ООН, 2020. 81 с.

² Energy transition investment trends. Bloombergnef (BNEF), 2022. P. 21.

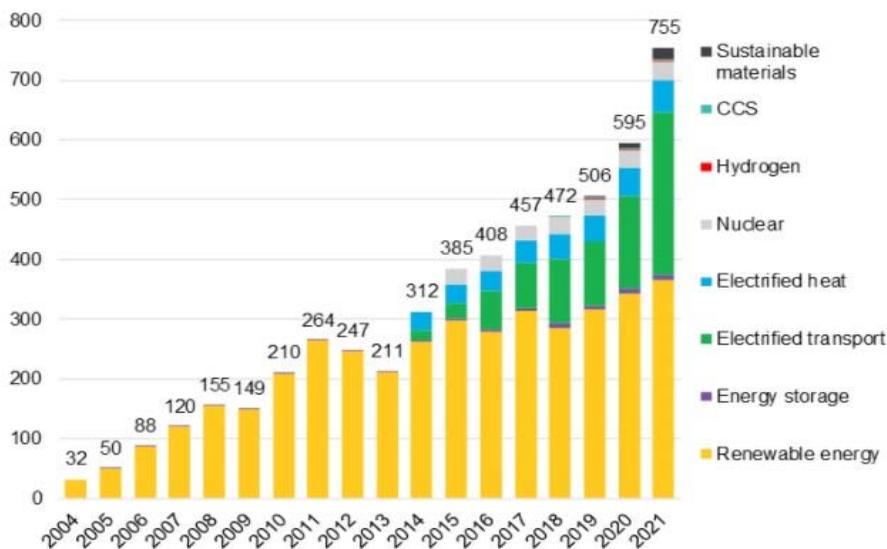


Figure 1. Global investment in the energy transition increasing in 2004–2021, US\$ billion
Source: Energy transition investment trends. Bloomberg (BNEF). 2022. p. 21

Хотя Россия обладает значительными запасами угля, нефти и природного газа, правительство нашей страны также заявило о намерениях снижения выбросов CO₂ и достижения углеродной нейтральности к 2050 г. Парижское соглашение по климату вступило в силу для России 06.11.2019 г. Основными путями в этом процессе намечены повышение энергоэффективности, расширение использования ВИЭ, развитие водородной энергетики и электротранспорта. В Энергетической стратегии РФ до 2035 г. указывается на необходимость увеличения роли использования возобновляемых источников энергии в энергообеспечении страны³. Стоящие перед Россией, в соответствии с мировой тенденцией энергоперехода и декарбонизации экономики, задачи по развитию возобновляемой энергетики стали активно решаться в течение последних нескольких лет. В России благодаря государственной поддержке было создано отечественное производство высокоэффективных гетероструктурных солнечных модулей, работают предприятия по производству деталей ветроагрегатов. По программе ДПМ 2015 г. проводились ежегодные конкурсные отборы на строительство электростанций на ВИЭ. В результате суммарная мощность объектов ВЭ в рамках ДПМ-1 составила на 01.01.22 3609,2 МВт, в том числе 69 СЭС – 1654,6 МВт, 22 ВЭС – 1937,7 МВт, 3 МГЭС – 20,9 МВт⁴. Объем ввода в России мощностей по программе ВИЭ до 2024 г. запланирован в 5,4 ГВт, из них ВЭС – 3,4 ГВт, СЭС – 1,9 ГВт.

³ Правительство РФ. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 №1523-р. 2020.

⁴ НП Совет рынка. Перечень квалифицированных энергообъектов, функционирующих на основе ВИЭ. URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm> (дата обращения: 10.03.22).

Актуальным представляется проведение оценок современной роли ВЭ в России в процессе энергетического перехода.

Для использования ВИЭ в России чрезвычайно важна инвестиционная привлекательность проектов, а она обусловлена в энергетической сфере, как показывает международный опыт⁵, степенью риска данных проектов [1]. В значительной степени природно-ресурсные риски работы фотоэлектрических станций определяются изменчивостью поступления солнечной радиации и другими природно-климатическими особенностями территории размещения этих станций. В настоящее время методы геоинформатики активно используются при изучении потенциала солнечной энергии и оценке рисков для различных территорий⁶ [2–5]. Геоинформационные системы (ГИС) открывают возможности для решения ряда важных задач, таких как визуализация ресурсов для расчета величин технического и экономического энергопотенциала по видам ВИЭ, анализ территорий по уровню обеспеченности ресурсами и возможности размещения на них объектов солнечной и ветровой энергетики применительно к разным масштабам территориальных исследований.

Методы и материалы

В данной статье представлены результаты исследований, выполненных с целью оценки роли солнечной энергетики в России в процессе снижения выбросов CO₂ и перехода к низкоуглеродной экономике и рисков выработки гарантированных объемов электроэнергии на СЭС в регионах страны. В связи с тем что в последние годы в России было сооружено более 65 солнечных электростанций, проводится анализ объема выработки электроэнергии на данных станциях и уровня использования установленных мощностей. На основании проведенного анализа с учетом характера региональных энергобалансов поставлена задача оценить возможный уровень объемов покрытия потребностей в электроэнергии гелиоэнергетикой в настоящее время. Проведение анализа данных о введенных в строй солнечных фотоэлектрических станциях в России послужило основой для оценок ежегодных размеров снижения выбросов углекислого газа в регионах, исходя из прогнозируемых объемов выработки электроэнергии на данных экологически безопасных энергообъектах. Для расчетов доли покрытия энергопотребления были проведены сопоставления объемов выработки электроэнергии на СЭС региона и объема энергопотребления субъекта РФ по данным Росстата⁷. Оценки потенциала сокращения выбросов парниковых газов за счет наращивания мощностей солнечных электростанций проведены из расчета, что производство

⁵ Solar Risk Assessment Report: Quantitative Insights from the Industry Experts. 2022. San Francisco: kWh Analytics. 25 p.

⁶ Accurate and efficient solar energy assessment. Solar GIS Brochure. Slovakia, Bratislava: Solargis, 2019. 9 p.

⁷ Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики (Росстат). URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (дата обращения: 10.03.2022).

электроэнергии в России в среднем сопровождается выбросами около 490 г CO₂/кВт·ч⁸. Однако если идет замещение угольных ЭС (выбросы около 900 г CO₂/кВт·ч), то при расчетах «невыбросов CO₂» вследствие получения электроэнергии на СЭС результаты расчетов необходимо увеличить. При выполнении оценочных расчетов нами также учитывались объемы эмиссии углекислого газа, связанные со всем «жизненным циклом» СЭС (производство фотоэлектрических модулей из высокоочищенного кремния, металлических рамок и стоек для солнечных панелей, утилизация и вторичная переработка панелей и др.). Анализ публикаций по данному вопросу показал, что за среднее значение выбросов фотоэлектрических станций может быть принято значение в 35 г CO₂-экв/кВт·ч вырабатываемой электроэнергии [5]. При этом удельные объемы выбросов CO₂ сокращаются, что обусловлено развитием технологий и снижением материалоемкости фотоэлектрических преобразователей и инверторов. СЭС при эксплуатации негативного влияния на окружающую среду не оказывают, занятые фотоэлектрическими панелями территории могут использоваться как пастбища (Solargrazing). Затенение от фотоэлектрических модулей, и, соответственно, незначительное охлаждение почвы, как правило, благоприятно влияет на экосистему и способствует увеличению биоразнообразия [6].

В статье для определения уровня надежности энергообеспечения от СЭС была применена разработанная авторами методика, предлагаемая для оценки рисков стабильности работы гелиоэнергетических станций с использованием геоинформационных технологий (ГИС), основанная на учете изменчивости поступления солнечной радиации [7]. В соответствии с данной методикой были проведены и расчеты статистических характеристик солнечной радиации по данным базы NASA POWER за десятилетний период (2009–2018 гг.)⁹ для целей оценки изменчивости во времени и пространстве поступления суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность. Массивы данных для выполнения расчетов были сформированы из указанных исходных материалов с шагом сетки 0,5×0,5°. Для определения уровня изменчивости прихода солнечной радиации на горизонтальную поверхность были проведены расчеты значений коэффициентов вариации (C_v) суточных и среднемесячных значений инсоляции¹⁰. Подробное описание методики расчетов представлено в [7].

Были выполнены вычисления среднегодовых значений коэффициентов вариации поступления солнечной радиации для каждого месяца и для года. Межгодовая изменчивость оценивалась по распределениям значений коэффициента вариации среднемесячных суточных сумм инсоляции (C_v мес).

⁸ Углеродоемкость электроэнергии в мире и России // Энергетический бюллетень Аналитического центра при Правительстве РФ. 2019. Вып. 72. С. 14–18. (In Russ.)

⁹ База данных NASAPOWER. URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer> (дата обращения: 10.03.2022).

¹⁰ Там же.

Базируясь на полученных многолетних данных с применением ГИС-технологий, были построены карты распределения среднемесячных значений $C_{v \text{ мес}}$ за 10-летний период (2009–2018 гг.), оценивалась также и внутримесячная изменчивость путем расчетов $C_{v \text{ сут}}$ за каждый месяц десятилетнего периода. В данной статье представлены результаты расчетов и оценок рисков использования гелиоресурсов в Оренбургской области.

При проведении исследования применялись расчетные статистические методы, прогнозно-аналитические методы, экономико-географический анализ и экспертные оценки. Базой для проведения расчетов послужили материалы компаний – производителей энергии, Системного оператора Единой энергосистемы (СО ЕЭС) России, статистические данные Госкомстата РФ и НП «Совет рынка».

Результаты и их обсуждение

На основе расчетов суммарной установленной мощности солнечных фотоэлектрических станций, работающих в России на начало 2022 г. для регионов с суммарной мощностью СЭС более 5,0 МВт, проведено их ранжирование по уровню развития гелиоэнергетики (табл. 1). Для расчетов выработки электроэнергии в регионах было принято среднегодовое значение коэффициента использования установленной мощности ($K_{\text{иум}}$) 15,2 % по солнечным электростанциям РФ за 2020–2021 гг. согласно данным СО ЕЭС РФ¹¹.

Лидирующие места по установленной мощности СЭС в России занимают Оренбургская (360,0 МВт) и Астраханская (275,0 МВт) области, в которых доля солнечной ЭЭ в энергобалансах составляет соответственно 2,75 и 8,5 %. Солнечная гелиоэнергетика уже на современном этапе позволяет обеспечить 35,7 % энергопотребления в Республике Калмыкия и 23,2 % – в Республике Алтай. Это особенно важно для таких неравномерно заселенных регионов, где ранее энергообеспечение обеспечивалось преимущественно за счет топливных дизель-генераторов, причем в весьма лимитированных объемах и сроках. Доступность экологически чистой электроэнергии для потребителей позволяет также снизить потери в электросетях, поскольку в изношенных распределительных системах они могут составлять до 20 %. Значимые доли выработки солнечной энергии в энергобалансах можно отметить также в Республике Бурятия (3,0 %), в Ставропольском крае (1,3 %) и в Волгоградской области (1,0 %). В остальных регионах суммарная установленная мощность СЭС менее 100 МВт и доля в энергообеспечении – менее 1 %. Создание отечественного производства гетерогенных модулей в г. Новочеркасск обеспечивает дальнейшее успешное развитие солнечной электрогенерации в России. По выполненным расчетам производство электроэнергии на солнечных электростанциях уже на современном этапе позволяет ежегодно избежать выбросов в 1000 тыс. т углекислого газа в регионах России.

¹¹ Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 г. Системный оператор Единой энергосистемы. М.: Минэнерго, 2022. 33 с. Официальный сайт АО «СО ЕЭС». URL: <https://www.so-ups.ru> (дата обращения: 10.03.2022).

Таблица 1. Оценка потенциала сокращений выбросов CO₂ и производства электроэнергии на действующих СЭС в регионах России (по состоянию на 01.01.2022 г.)

№	Субъект РФ	Установленная мощность СЭС на 01.01.22, МВт	Выработка ЭЭ за год, млн кВт*ч	Потребление ЭЭ в регионе 2020г., млн кВт*ч	Доля ЭЭ СЭС в энергобалансе, %	Сокращение выброса, CO ₂ , тыс. т
1	Оренбургская область	360,0	479,35	17415,9	2,75	218,10
2	Астраханская область	275,0	366,17	4311,8	8,50	166,61
3	Республика Калмыкия	196,5	261,65	731,9	35,75	119,05
4	Республика Алтай	120,0	159,78	688,6	23,20	72,70
5	Волгоградская область	120,0	159,78	16423,2	0,97	72,70
6	Республика Бурятия	115,0	153,12	5057,2	3,03	69,67
7	Ставропольский край	100,0	133,15	10233,9	1,30	60,58
8	Республика Башкортостан	94,0	125,16	25280,2	0,50	56,95
9	Самарская область	75,0	99,86	24889,4	0,42	45,43
10	Саратовская область	70,0	93,20	12520,2	0,73	42,41
11	Омская область	60,0	79,89	10351,1	0,77	37,15
12	Забайкальский край	50,0	66,58	8192,5	0,81	30,29
13	Республика Адыгея	8,9	11,85	1649,0	0,72	5,39
14	Республика Хакасия	5,2	6,92	16468,5	0,04	3,46
15	Чеченская Республика	5,0	6,65	2904,0	0,23	3,15
	<i>Итого</i>	1654,6	2203,11	–	–	1002,42

Источник: составлено авторами с использованием данных: НП Совет рынка. Перечень квалифицированных энергообъектов, функционирующих на основе ВИЭ. URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm> (дата обращения: 10.03.22); Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики (Росстат). URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (дата обращения: 10.03.2022).

Table 1. Assessment of the potential for reducing CO₂ emissions and electricity generation at existing SPP in the regions of Russia (for 01.01.2022)

No.	Region	Installed SPP's capacity for 01.01.22, MWh	Production of energy for the year, mln kWh	Energy consumption for 2020, mln kWh	The share of energy from SPP in the energy balance, %	Reduction of CO ₂ emission, kilotons
1	Orenburg region	360.0	479.35	17415.9	2.75	218.10
2	Astrakhan region	275.0	366.17	4311.8	8.50	166.61
3	Republic of Kalmykia	196.5	261.65	731.9	35.75	119.05
4	Altai Republic	120.0	159.78	688.6	23.20	72.70
5	Volgograd region	120.0	159.78	16423.2	0.97	72.70
6	Republic of Buryatia	115.0	153.12	5057.2	3.03	69.67
7	Stavropol' region	100.0	133.15	10233.9	1.30	60.58
8	Republic of Bashkortostan	94.0	125.16	25280.2	0.50	56.95
9	Samara region	75.0	99.86	24889.4	0.42	45.43
10	Saratov region	70.0	93.20	12520.2	0.73	42.41
11	Omsk region	60.0	79.89	10351.1	0.77	37.15
12	Zabaykalsky region	50.0	66.58	8192.5	0.81	30.29
13	Republic of Adygea	8.9	11.85	1649.0	0.72	5.39
14	Republic of Khakassia	5.2	6.92	16468.5	0.04	3.46
15	Chechen Republic	5.0	6.65	2904.0	0.23	3.15
	<i>Total</i>	1654.6	2203.11	–	–	1002.42

Source: compiled by the authors using data: Association NP Market Council. List of qualified operating RES energy facilities in Russia. (In Russ.). Available from: <https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm> (accessed: 10.03.2022); Official website of the Federal State Statistics Service (Rosstat) (In Russ.). Available from: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (accessed: 10.03.2022).

В настоящем исследовании рассмотрены результаты оценок рисков по предлагаемой методике для территорий Оренбургской области в сопоставлении с расчетными значениями коэффициента использования установленной мощности ($K_{иум}$) для действующих СЭС в 2019 г. по данным о выработке на СЭС ОАО «Авелар Солар Технолоджи» (Nevel) за период 2019–2020 гг. (табл. 2). Для интерпретации и визуализации результатов расчетов рисков неравномерности выработки электроэнергии на солнечных электростанциях Оренбургской области использованы ГИС-технологии (рис. 2).

Анализ развития гелиоэнергетики на территории Оренбургской области показал, что к началу 2022 г. в исследуемом регионе были смонтированы 14 солнечных электростанций, их суммарная установленная мощность составляет 360 МВт. Это более 22 % всех работающих в России СЭС. Электростанции построены из фотоэлектрических модулей, преимущественно гетероструктурных, производимых в России на заводе в Новочебоксарске. В рамках программы развития возобновляемой энергетики «Солнечная система» ГК «Т Плюс» реализовала проекты на четырех площадках общей мощностью 190 МВт. 8 СЭС были построены ОАО «Авелар Солар Технолоджи» (NEVEL), две из них (Плешановская и Грачевская) в конце 2017 г. были переданы в собственность ПАО «Фортум». Расчеты и анализ авторов о выработке электроэнергии на СЭС базировались на данных, опубликованных компанией NEVEL¹².



Рис. 2. Карта распределения значений $C_{гис}$ поступления суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность в Оренбургской области по данным базы NASA POWER за десятилетний период (2009–2018 гг.)

¹² Официальный сайт ГК ХЕВЕЛ. URL: <https://www.hevelsolar.com> (дата обращения: 10.03.2022).

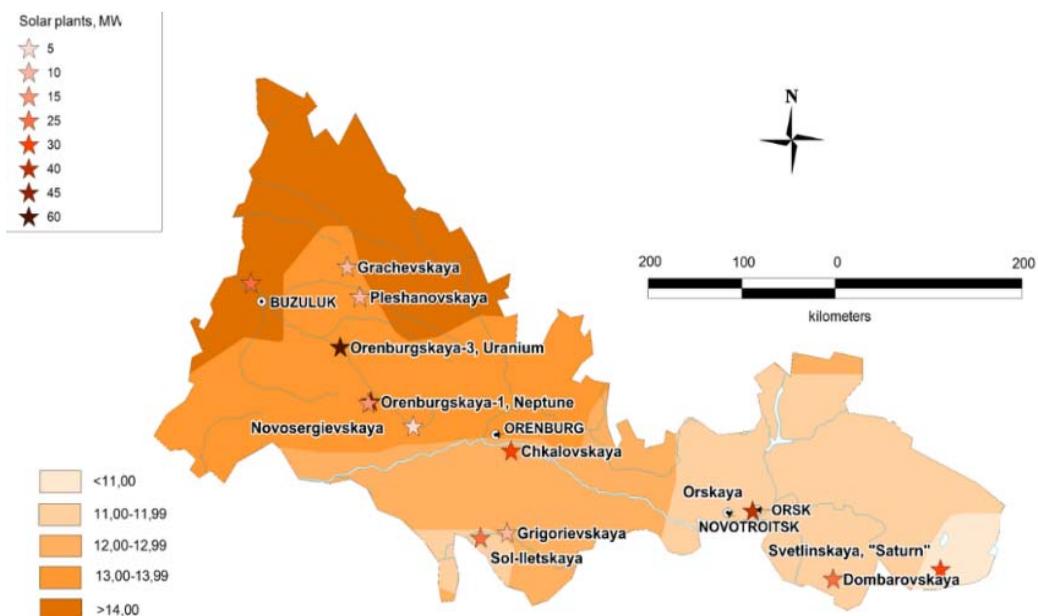


Figure 2. Distribution map of C_{vmonth} values of total solar radiation on a horizontal surface according to the NASA POWER database for a ten-year period (2009–2018)

Таблица 2. Результаты расчета эффективности работы СЭС Оренбургской области в 2019–2020 гг.

СЭС	Мощность, МВт	Ввод в эксплуатацию	$K_{\text{инст}}$, %				
			II кв. 2019 г.	III кв. 2019 г.	IV кв. 2019 г.	I кв. 2020 г.	Ср. год.
Переволоцкая	5	22.10.15	22,76	17,57	5,02	8,43	13,45
Соль-Илецкая	25	17.04.17	21,36	16,72	6,55	9,33	14,24
Чкаловская	30	21.02.19	22,73	17,44	5,22	9,41	13,72
Григорьевская	10	27.05.19	21,44	18,98	6,98	10,11	14,38
Елшанская	25	27.06.19	–	18,76	6,37	9,87	–
Домбаровская	25	28.11.19	–	–	–	7,96	–

Источник: расчеты авторов по данным: НП Совет рынка. Перечень квалифицированных энергообъектов, функционирующих на основе ВИЭ. URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm> (дата обращения: 10.03.22); Официальный сайт ГК ХЕВЕЛ. URL: <https://www.hevelsolar.com> (дата обращения: 10.03.2022).

Table 2. The results of calculating the efficiency of the Orenburg region SPP in 2019–2020

SPP name	Capacity, MW	Commissioning date	Installed power factor, %				
			II quarter 2019	III quarter 2019	IV quarter 2019	I quarter 2020	Annual
Perevolotskaya	5	22.10.15	22.76	17.57	5.02	8.43	13.45
Sol-Iletskaia	25	17.04.17	21.36	16.72	6.55	9.33	14.24
Chkalovskaya	30	21.02.19	22.73	17.44	5.22	9.41	13.72
Grigorievskaya	10	27.05.19	21.44	18.98	6.98	10.11	14.38
Elshanskaya	25	27.06.19	–	18.76	6.37	9.87	–
Dombarovskaya	25	28.11.19	–	–	–	7.96	–

Source: authors' calculations based on data: Association NP Market Council. List of qualified operating RES energy facilities in Russia. (In Russ.). Available from: <https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm> (accessed: 10.03.2022); The official website of the HEVEL Group of Companies. (In Russ.). Available from: <https://www.hevelsolar.com> (accessed: 10.03.2022)

Наиболее эффективно СЭС в Оренбургской области работали во II квартале, минимум выработки электроэнергии приходился на IV квартал (см. табл. 2). Во II квартале световой день уже достаточно длинный, но температуры воздуха еще не так высоки, как в июле-августе, – условия для генерации оптимальные. В зимний период длительность и интенсивность поступления солнечной радиации значительно ниже, часты снегопады, вьюги, туманы, эти факторы снижают генерацию электроэнергии фотоэлектрическими панелями в несколько раз по сравнению с апрелем-июнем. При оценках рисков работы СЭС необходимо учитывать и данные о распределении снеговых нагрузок на поверхности фотоэлектрических панелей в их наиболее неблагоприятных расчетных сочетаниях. Для прогнозов эффективности работы фотоэлектрических панелей важными характеристиками являются высота и продолжительность снежного покрова. Засыпание рабочей поверхности снегом приводит к значительному снижению расчетных значений мгновенного КПД модулей (более 35–40 %) [8; 9]. Расчеты $K_{\text{иум}}$ (см. табл. 2) показывают более высокую эффективность СЭС в центральных районах: СЭС Соль-Илецкая ($K_{\text{иум}} = 14,24 \%$) и СЭС Григорьевская ($K_{\text{иум}} = 14,38 \%$) расположены в зоне пониженной изменчивости поступления солнечной радиации – $C_{\text{v мес}}$ менее 12 % – зоне низких ресурсных рисков (см. рис. 2). Необходимо отметить, что выделение зон разной степени риска по предлагаемой методике зависит от физико-географических условий региона. Так, для СЭС в Астраханской области, где внутригодовые условия инсоляции более равномерные и практически отсутствуют длительные снегопады, также путем сопоставления значений $K_{\text{иум}}$ работающих СЭС и результатов расчетов и распределения по территории области значений $C_{\text{v мес}}$ нами были выделены следующие критерии риска получения гарантированной выработки на: $C_{\text{v мес}}$ – менее 11 % – низкие риски, от 11 до 12 % – средний уровень риска и более 12 % – наиболее высокие ресурсные риски.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет выделять в регионах на основе расчетов характеристик изменчивости поступления солнечной радиации на земную поверхность по дистанционным данным зоны разного уровня риска эффективности работы солнечных фотоэлектрических систем в плане стабильности выработки электроэнергии.

Заключение

Показана значимая роль гелиоэнергетики, как инструмента перехода к низкоуглеродному энергообеспечению, в ряде регионов России. Анализ данных о вводе в строй гелиоэнергетических станций в России по Программе поддержки возобновляемой энергетики ДПМ-1 показал, что к началу 2022 г. в стране эксплуатировались 69 СЭС в 15 регионах страны. Расчеты суммарной установленной мощности СЭС в каждом регионе и региональные оценки перспектив годового производства электроэнергии, исходя из средне-годовых значений коэффициента использования установленной мощности в

сопоставлении с энергопотреблением в регионах, позволили выполнить ранжирование регионов по объемам установленной мощности, а также по доле гелиоэнергии в энергобалансах субъектов РФ. Показано, что на лидирующих позициях по суммарной установленной мощности СЭС находятся Оренбургская и Астраханская области, соответственно – 360 и 275 МВт, а наибольшую долю в региональном энергопотреблении гелиоэнергетика обеспечивает в Республиках Калмыкия (35,75 %) и Алтай (23,2 %).

Базируясь на данных о средних для РФ выбросах углекислого газа при выработке электроэнергии и оценках значений эмиссии CO₂ в течение всего жизненного цикла СЭС, выполнены расчеты размеров эмиссии CO₂, которых удалось избежать благодаря вводу в строй солнечных фотоэлектрических станций, а не топливных ЭС. По нашим расчетам, общий ежегодный объем «невыбросов» составляет 1000 тыс. т углекислого газа в регионах России.

Для оценки природно-ресурсных рисков дальнейшего развития гелиоэнергетики в России на основе разработанной авторами методики проведены расчеты характеристик изменчивости поступления солнечной радиации и их анализ с применением ГИС-технологий. Сопоставление полученных результатов и данных об эффективности работы действующих СЭС в Оренбургской области позволило выделить зоны различного уровня риска эффективности работы солнечных фотоэлектрических систем в плане стабильности выработки электроэнергии.

Список литературы / References

- [1] Kozlova M, Collan M. Renewable energy investment attractiveness: Enabling multi-criteria cross-regional analysis from the investors' perspective. *Renewable Energy*. 2020;(150):382–400. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.134>
- [2] Kargashin P, Prasolova A, Novakovsky B, Rafikova Yu, Gorbunov R, Gorbunova T. Data processing as a critical part of GIS-based mapping of renewable energy perspectives. *MATEC Web of Conf.* 2018;178(09004). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817809004>
- [3] Choi Y, Suh J, Kim S-M. GIS-based solar radiation mapping, site evaluation, and potential assessment: A review. *Applied Sciences*. 2019;9(9):1960. <https://doi.org/10.3390/app9091960>
- [4] Garni A, Awasthi A, Ramli M. Optimal design and analysis of gridconnected photovoltaic under different tracking systems using HOMER. *Energy Convers. Manag.* 2018;155(1):42–57. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.090>
- [5] Gerbinet S, Belboom S, Léonard A. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;38:747–753. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.043>
- [6] Tawalbeh M, Al-Othman A, Kafiah F, Abdelsalam E, Almomani F, Alkasrawi M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. *Science of the Total Environment*. 2021;(759):143528. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/3/032086>
- [7] Nefedova LV, Rafikova Yu Yu, Soloviev DA. Application of climatic characteristics statistical assessments and GIS-technologies for solar energy systems development. *IOP*

Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021;1079(032086(1–6)):3. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/3/032086>

- [8] Andenæs E, Jelle B, Ramlo K, Kolas T, Selj J, Foss S. The influence of snow and ice coverage on the energy generation from photovoltaic solar cells. *Solar Energy*. 2018;159:318–328. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.078>
- [9] Kolomiets Yu, Tarasenko A, Tebuev V, Suleymanov M. Investigation of the influence of various pollution types on operational efficiency of solar power installations in Moscow. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2018;(4–6):12–24. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.04-06.012-024>

Сведения об авторах:

Нефедова Людмила Вениаминовна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии, Географический факультет, Московский государственный университет М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские Горы, д. 1. ORCID: 0000-0002-6022-0617; eLIBRARY SPIN-код: 8763-9467. E-mail: nefludmila@mail.ru

Рафикова Юлия Юрьевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии, Географический факультет, Московский государственный университет М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские Горы, д. 1. ORCID: 0000-0003-3204-9135, eLIBRARY SPIN-код: 6001-7680. E-mail: ju.rafikova@mail.ru

Bio notes:

Liudmila V. Nefedova, PhD in Geography, Senior Researcher in Laboratory of Renewable Energy Sources, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory St, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-6022-0617; eLIBRARY SPIN-код: 8763-9467. E-mail: nefludmila@mail.ru.

Yulia Yu. Rafikova, PhD in Geography, Senior Researcher in Laboratory of Renewable Energy Sources, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory St, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-3204-9135, eLIBRARY SPIN-код: 6001-7680. E-mail: ju.rafikova@mail.ru