УДК 621.315.592 Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2026-19-9-82-94

Влияние накопления пыли на производительность фотоэлектрических панелей: исследование на примере университетского больничного центра Каменге, Бурунди

Ж. П. Бизумуремый✉, Д. Н. Туркин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ bizipaul5@mail.ru

Аннотация. Цель данного исследования состоит в количественной оценке удельного влияния накопления пыли на производительность фотоэлектрических панелей в Бурунди на примере мини-электростанции в университетском больничном центре Каменге. Экспериментальное исследование проводилось на электростанции с 1920 панелями SANYO (по 210 Вт каждая) в течение 48 дней (с августа по сентябрь 2025 г.). Методология заключалась в ежедневных измерениях выходной мощности и солнечной радиации между 12:00 и 13:00, сравнивая период накопления пыли (сухой сезон) и период естественной очистки (сезон дождей). Результаты показали прямую корреляцию между солнечным светом и выработкой энергии. Средняя выходная мощность составила 405.85 кВт в сухой период (пыльные панели) по сравнению с 433.63 кВт после дождей (чистые панели), что представляет собой прирост на 27.79 кВт. Потери мощности, связанные с пылью, были рассчитаны в размере 6.4 %. В исследовании сделан вывод о том, что накопление пыли значительно снижает эффективность фотоэлектрических установок в данном контексте, в первую очередь за счет уменьшения выходного тока. Подчеркивается необходимость внедрения упреждающих стратегий очистки, особенно в продолжительный сухой сезон, для оптимизации производства энергии, обеспечения окупаемости инвестиций и поддержания надежного электроснабжения.

Ключевые слова: фотоэлектрические панели, солнечная энергия, пыль, очистка, производительность

Для цитирования: Бизумуремый Ж. П., Туркин Д. Н. Влияние накопления пыли на производительность фотоэлектрических панелей: исследование на примере университетского больничного центра Каменге, Бурунди // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 9. С. 82–94. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-82-94.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Impact of Dust Accumulation on the Performance of Photovoltaic Panels: A Case Study at the Kamenge University Hospital Center, Burundi

J. P. Bizumuremyi✉, D. N. Turkin

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ bizipaul5@mail.ru

Abstract. The objective of this study was to quantify the specific impact of dust accumulation on the performance of photovoltaic panels in Burundi, focusing on a mini-power plant at the Kamenge University Hospital Center. The pilot study was conducted at the plant with 1.920 SANYO panels (210 W each) over a 48-day period (August to September 2025). The methodology consisted of daily measurements of power output and solar radiation between 12:00 and 13:00, comparing the period of dust accumulation (dry season) and the period of natural clearing (rainy season). The results showed a direct correlation between sunlight and power generation. The average power output was 405.85 kW during the dry season (dusty panels) compared to 433.63 kW after the rains (clean panels), representing an increase of 27.79 kW. Power losses due to dust were calculated

 © Бизумуремый Ж. П., Туркин Д. Н., 2026

at 6.4 %. The study concluded that dust accumulation significantly reduces the efficiency of photovoltaic systems in this context, primarily by reducing output current. It emphasizes the need to implement proactive cleaning strategies, especially during the extended dry season, to optimize energy production, ensure investment returns, and maintain reliable power supply.

Keywords: photovoltaic panels, solar energy, dust, cleaning, performance

For citation: Bizumuremyi J. P., Turkin D. N. Impact of Dust Accumulation on the Performance of Photovoltaic Panels: A Case Study at the Kamenge University Hospital Center, Burundi // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 9. P. 82–94. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-82-94.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Введение. Будущее мира связано с возобновляемыми источниками энергии. В этом отношении солнечная энергия представляет собой одну из лучших форм устойчивой и чистой энергии. Рынок солнечных панелей в последние годы значительно вырос, в первую очередь из-за продолжающегося роста цен на нефть и растущего осознания срочной необходимости сокращения выбросов углекислого газа CO_2 [1]. Внедрение фотоэлектрических систем резко возросло в регионах с высоким уровнем солнечного света – как засушливых и полузасушливых районах, где солнечный свет обилен и постоянен [2]. Бурунди – развивающаяся страна, в настоящее время имеющая мощность производства электроэнергии в размере 130.969 МВт, из которых 6.8 % приходится на солнечную энергию [3]. Эффективность солнечных энергетических систем зависит от различных факторов, включая ориентацию поверхности, угол наклона, географическое положение, климатические условия, солнечную радиацию, влажность и температуру [4]. Пыль может попадать в окружающую среду со строительных площадок, промышленных предприятий, от пыльных бурь, и др. Пыль состоит из видимых и невидимых висящих в воздухе и опустившихся частиц твердого вещества [5]. Размер частиц пыли, их состав и поведение при осаждении варьируются в зависимости от рельефа, климата и урбанизации региона. Характеристики пыли можно классифицировать по размеру или распределению, плотности или форме, заряду и составу [6]. Тем не менее, отложение пыли на активных поверхностях солнечных энергетических систем остается основным фактором, оказывающим значительное влияние на энергетическую отдачу, рентабельность и эффективность системы [4]. Накопление пыли на модуле существенно влияет на максимальную мощность и пиковый ток. Значительное накопление пыли на модуле приводит к более значительному снижению некоторых электрических характеристик. Кроме того, накопление пыли усиливает затенение и препятствует проникновению солнечного излучения к поверхности панели, что в свою очередь приводит к перегреву отдельных ее частей, что снижает производительность фотоэлектрического элемента и снижает его электрические характеристики [7]. Авторы [8] исследовали влияние пыли, используя искусственную пыль при постоянном освещении в лабораторных условиях. Они показали, что пыль влияет на производительность фотоэлектрических панелей. Снижение пиковой генерируемой мощности может достигать 18 %. По данным авторов [9] пыль, оседавшая на поверхности поликристаллических и монокристаллических фотоэлектрических модулей в течение года без очистки, приводит к максимальным потерям мощности P_{max}, составляющим от 18 до 78 % максимального тока I_{max} и от 23 до 80 % тока короткого замыкания $I_{к.з}$. Эффективность панели снижается с увеличением плотности пыли на ее поверхности, особенно при высоких уровнях солнечной радиации, скорости ветра и влажности воздуха. Эксперименты, проведенные Рамаданом Дж. Мустафой в 2020 г. [10], показывают, что накопление пыли снижает выходную мощность на 8.8 % и эффективность на 11.86 %. Поэтому солнечные элементы следует регулярно очищать (не реже одного раза в неделю, и особенно во время равноденствий) в зависимости от суровости погодных условий в географической зоне применения. Анил Кумар Сисодия [11] исследовал влияние мелких частиц пыли на выходную мощность фотоэлектрической панели в различных условиях окружающей среды. Его результаты показывают, как накопление пыли влияет на производительность фотоэлектрического модуля, в частности на его выходную мощность. Производительность

панели постепенно снижается с увеличением накопления пыли на стеклянной пластине. Была зарегистрирована значительная потеря мощности (от 12.52 до 16.29 %) на различных площадках, где были установлены фотоэлектрические панели. Авторы [12] в своем исследовании влияния осаждения пыли на производительность фотоэлектрических панелей пришли к выводу, что осаждение пыли не оказывает существенного влияния на напряжение холостого хода фотоэлектрических систем. Однако ток короткого замыкания, возникающий при использовании на открытом воздухе, падает на 4–5 %. Это падение тока и, как следствие, потеря мощности из-за пыли представляют собой значительную потерю электроэнергии и существенный экономический ущерб для фотоэлектрических электростанций, учитывая их размер. Цель данной статьи – определить расчетным путем воздействие окружающей среды, на примере пыли, на производительность фотоэлектрических модулей в Бурунди, а именно в университетском госпитальном центре Каменге.

Происхождение, состав и факторы накопления пыли. Термин «пыль» относится к любому веществу или частице, присутствующей в атмосфере с диаметром менее 500 мкм, обычно происходящим из различных источников. Это определение включает частицы почвы, дым, вулканические пары, пыльцу, микроволокна, микробы и эрозию известняка [1], [11]. Она состоит из твердых частиц, как видимых, так и невидимых, взвешенных или падающих. На накопление пыли влияют различные экологические и метеорологические факторы, деятельность человека, выхлопные газы, вулканическая активность, загрязнение воздуха, промышленная деятельность, растительность, транспорт, эрозия склонов и гор, связанная с погодными условиями, и грязевые бури; поэтому количество пыли варьируется от региона к региону [7]. Образование пыли усиливается, прежде всего, из-за изменения климата, опустынивания и упадка сельского хозяйства, что приводит к пагубным социальным, региональным и экономическим последствиям для жизни человека. К сожалению, простого решения этих проблем до сих пор не найдено и альтернативные подходы не рассматривались [10]. Четыре ключевых фактора влияют на накопление грязи и пыли на фотоэлектрических панелях (рис. 1). Основным фактором служат климатические условия, включая влажность, атмосферное давление, облучение, ветер и штормы. Еще один фактор – условия окружающей среды, в частности такие загрязняющие вещества, как углерод и глина. Местоположение объекта, особенно широта, долгота и местная растительность, также играют свою роль. Наконец, важны свойства фотоэлектрических панелей, включая угол наклона, характеристики покрытия и электростатические свойства. Кроме того, на эффективность фотоэлектрических систем влияют химические, биологические и электрические характеристики пыли. Таким образом, накопление частиц пыли особенно зависит от их формы, размера и массы [1].



Рис. 1. Факторы, влияющие на накопление пыли [1]
Fig. 1. Factors influencing dust accumulation [1]

Обзор влияния отложений пыли на эффективность фотоэлектрических систем. Применение фотоэлектрических систем сталкивается со многими проблемами во всем мире. Одна из важнейших – накопление атмосферной пыли на поверхности солнечных панелей, что приводит к резкому снижению их производительности. Эта атмосферная пыль оказывает ряд воздействий на использование фотоэлектрических систем, включая уменьшение количества солнечного света, достигающего поверхности, что приводит к снижению их эффективности [13].

В некоторых исследованиях изучалось влияние накопления пыли на производительность фотоэлектрических систем [14]. Степень снижения эффективности зависит от массы и размера частиц пыли, осаждающихся на поверхности фотоэлектрических модулей. С увеличением массы осажденной пыли выходная мощность и эффективность модуля снижаются, а с уменьшением размера снижается и выходная мощность, поскольку более мелкие частицы блокируют больше излучения на поверхности фотоэлектрических

модулей. Различные отложения загрязняющих веществ могут включать красную землю, золу, песок, карбонат кальция, кремний и т. д. Пыль, грязь и птичий помет служат основными причинами снижения производительности фотоэлектрической системы [15].

В пустынных районах накопление пыли на поверхности фотоэлектрических панелей весьма значительно. Снижение эффективности солнечной энергетики из-за пыли составляет около 40 %, в связи с чем в настоящее время применяются различные методы очистки фотоэлектрических систем. Анализ этой категории экологических последствий – наиболее частый и проблемный по сравнению с другими. Поэтому загрязнение, касающееся фотоэлектрических панелей, наблюдается регулярно в течение всего года, в отличие от других проблем, и в основном характеризуется накоплением частиц пыли на поверхности модулей. Эти частицы могут быть песком, золой и т. п., в зависимости от среды, в которой находилась панель [16]. Опыт в этой области включает анализ снижения солнечной радиации из-за пыли. Исследователи [17] экспериментально изучили влияние частиц пыли, осаждающихся на фотоэлектрических модулях, и предложили концепцию электрических характеристик. Исследование было сосредоточено на таких параметрах, как доступность радиации, эффективные стратегии эксплуатации, конструкция и размеры этих систем. Сделан вывод, что пыль существенно снижает эффективность фотоэлектрических модулей.

Был проведен анализ воздействия фотоэлектрических модулей на окружающую среду [13], который показал, что средние ежедневные потери энергии в течение года, вызванные пылью, оседающей на поверхности фотоэлектрических модулей, составляют около 4.4 %. В длительные периоды без осадков ежедневные потери энергии могут превышать 20 %. Частицы пыли различаются по фазе, типу, химическим и физическим свойствам в зависимости от многих условий окружающей среды. Воздух, влажность и температура, а также скорость ветра играют важную роль в определении изолированной пыли и ее накоплении на фотоэлектрических элементах. Наблюдалась динамика изменения мощности с ростом загрязнения фотоэлектрических элементов. Аналогично были проведены фундаментальные исследования загрязнения пылью стеклянных панелей фотоэлектрических модулей [18], которые показали снижение спектрального пропускания примерно на 35 % и общего пропускания примерно на 20 %, а скопившиеся частицы пыли в основном имели сферическую форму. Исследователи предложили теорию влияния осаждения пыли на производительность мультикристаллических фотоэлектрических модулей, основанную на экспериментальных измерениях [19], и изучили влияние пыли на производительность мультикристаллических фотоэлектрических модулей и ухудшение этих характеристик из-за осаждения и накопления различных загрязняющих веществ. Авторы [20] установили корреляцию между толщиной пыли, накопленной на фотоэлектрических модулях, и различиями в эффективности в сложном климате. Они пришли к выводу о значительном снижении эффективности фотоэлектрических модулей, порядка 10–20 %, при накоплении больших слоев пыли. Они также сообщили, что небольшое количество пыли на крышках фотоэлектрических модулей оказывает незначительное влияние на передачу солнечного света к кремниевому фотоэлектрическому модулю. В [21] исследовалось влияние различных параметров на эффективность и производительность фотоэлектрических панелей. Исследователи изучили влияние накопления грязи на производительность фотоэлектрических модулей и проанализировали влияние частиц на эти производительности [22], было показано, что внешнее сопротивление может снизить производительность фотоэлектрических систем до 85 %. Также было обнаружено, что солнечная энергия, достигающая солнечного элемента, теряется из-за поглощения/отражения: потери составляют примерно от 15 до 30 % полученной энергии. В период между дождями потери от загрязнения линейно увеличивались с течением времени, при этом средняя ежедневная потеря составляла 0.2 % [23].

Представление экспериментального протокола и методологии. Экспериментальное исследование проводилось на фотоэлектрической станции университетского больничного центра Каменге, расположенного в Бужумбуре, экономической столице Бурунди. Эта установка, занимающая площадь около 6300 м^2, состоит из 1920 фотоэлектрических панелей, расположенных в 24 ряда по 80 модулей в каждом (рис. 2). Панели установлены под фиксированным углом наклона 14.5º. Характеристики каждой солнечной панели представлены в табл. 1. Протокол сбора данных осуществлялся в течение 48 дней, с 9 авг. по

25 сент. 2025 г. Измерения проводились ежедневно с 12:00 до 13:00, что соответствует периоду максимального солнечного света. В устройство интегрированы два технических помещения: в одном находится система управления и контроля, где дисплеи позволяют в реальном времени визуализировать вырабатываемую мощность P, энергию, напряжение и силу тока; в другом находятся инверторы.



Рис. 2. Изображение установки
Fig. 2. Installation image

Табл. 1. Характеристики солнечных панелей
Tab. 1. Solar panel characteristics

Параметр	Номинальное значение
Максимальная мощность P_{max}, Вт	210
Максимальное напряжение V_{max}, В	41.3
Максимальный ток I_{max}, А	5.09
Напряжение холостого хода $V_{х.х}$, Вт	50.9
Ток короткого замыкания $I_{к.з}$, А	5.57
Максимально допустимый ток, А	15
Максимальное напряжение системы, В	600
Номинальная масса, кг	15.0
Размеры (длина × ширина × высота), мм	1580 × 812 × 35
Коэффициент ветроустойчивости	217
Бренд	SANYO (Япония)

Мощность, вырабатываемая солнечной панелью, как функция солнечной радиации и площади поверхности панели рассчитывается по формуле

$$P = IA,$$

где I – интенсивность излучения; A – площадь поверхности.

Следующее уравнение определяет эффективность фотоэлектрического модуля:

$$\eta = \frac{P_{max}}{AG} \cdot 100\ \%,$$

где G – падающее на фотоэлектрический модуль излучение,

$$P_{max} = V_{ТММ} I_{ТММ},$$

где $V_{ТММ}$ и $I_{ТММ}$ – напряжение и ток, соответствующие идеальной точке зарядки аккумулятора, или точке максимальной мощности (ТММ).

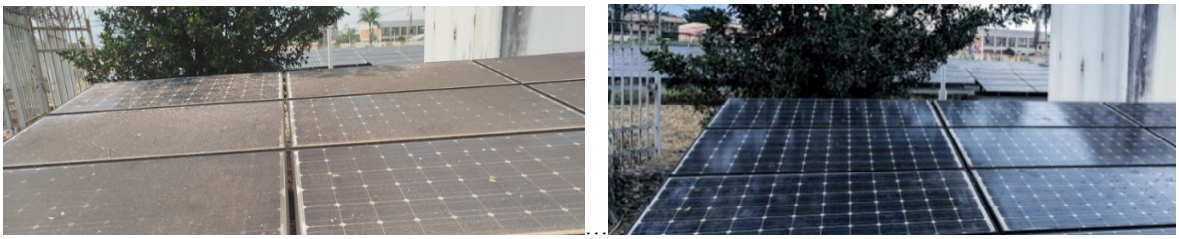
Коэффициент заполнения солнечного элемента – это отношение его максимальной мощности к произведению тока короткого замыкания $I_{к.з}$ на напряжение холостого хода $V_{х.х}$. Он выражается следующим образом [1]:

$$F = \frac{V_{ТММ} I_{ТММ}}{V_{х.х} I_{к.з}}.$$

В Бурунди сухой сезон, длящийся с июня по август, характеризуется высокой концентрацией пыли в воздухе и практически полным отсутствием осадков. Исследуемая площадка, расположенная вдоль бульвара 28 Ноября, особенно подвержена воздействию пылевых отложений, переносимых ветром с этой магистрали. В стране отсутствует национальная система промышленной очистки фотоэлектрических панелей. Техническое обслуживание в основном осуществляется естественным образом – дождем и ветром на крупных электростанциях, или регулярно вручную на бытовых установках.

Выбор периода сбора данных, охватывающего август и сентябрь, был стратегическим. Август, разгар сухого сезона, представляет собой период максимального накопления пыли на панелях (рис. 3, *а*). Сентябрь же знаменует собой возобновление дождей, что позволяет проводить естественную очистку модулей и, таким образом, обеспечивает сравнительную фазу для оценки восстановления производительности (рис. 3, *б*).

В течение первых трех дней исследования (с 9 по 11 авг. 2025 г.) проводилась предварительная



а *б*

Рис. 3. Изображение фотоэлектрических панелей: *а* – до выпадения осадков; *б* – во время дождя
Fig. 3. Image of photovoltaic panels: *а* – before precipitation; *б* – during rain

кампания почасовых измерений. Показания снимались каждый час с 8:00 до 17:00 (табл. 2). Целью этого подхода было определение пикового периода производительности системы.

Для основного этапа исследования в табл. 3 представлены данные, собранные с 12 авг. по 3 сент. 2025 г., что соответствует периоду, предшествовавшему дождям. В табл. 4 собраны данные 4–25 сент. 2025 г., в сезон дождей, что позволяет сравнить производительность с учетом накопления пыли и без него.

Интерпретация и обсуждение результатов. Анализ почасовых данных, собранных 9–11 авг. 2025 г., выявляет прямую корреляцию между интенсивностью солнечного излучения и выработкой электроэнергии. В этот период интенсивность солнечного излучения варьировалась от 0.11 до 0.80 кВт/м^2, а выработка электроэнергии – от 97.6 до 437.6 кВт.

На рис. 4 показано, что суточный пик выработки электроэнергии неизменно приходится на период с 12:00 до 13:00, при этом максимальная выработка электроэнергии достигает 390.7 кВт (09.08.2025), 398.8 кВт (10.08.2025) и 437.6 кВт (11.08.2025). Этот временной интервал соответствует периоду оптимальной солнечной активности, в течение которого фотоэлектрические модули улавливают солнечную энергию с максимальной эффективностью, что подтверждает его выбор в качестве единственного окна измерений для оставшейся части исследования.

Табл. 2. Почасовые измерения выходной мощности и интенсивности солнечного излучения с 9 по 11 авг. 2025 г.
Tab. 2. Hourly measurements of solar radiation output and intensity from August 9 to 11, 2025

Время, ч	09.08.25		10.08.25		11.08.25	
	I, кВт/м^2	*P*, кВт	*I*, кВт/м^2	*P*, кВт	*I*, кВт/м^2	*P*, кВт
8	0.18	108.7	0.15	102.7	0.2	110.5
9	0.24	115.7	0.23	113.2	0.3	123.3
10	0.47	201.1	0.49	203.5	0.37	154.8
11	0.55	214.1	0.67	390.8	0.59	342.7
12	0.71	390.7	0.72	392.5	0.77	412.1
13	0.69	387.3	0.74	398.8	0.8	437.6
14	0.6	345.2	0.63	351.2	0.69	385.5
15	0.36	119.9	0.41	155.1	0.52	201.3
16	0.25	101.6	0.27	110.2	0.29	110.9
17	0.11	97.6	0.19	108.3	0.24	112.1

Табл. 3. Мощность и интенсивность солнечного излучения до выпадения осадков
Tab. 3. Power and intensity of solar radiation before precipitation

Показатель	Даты																								
	12.08.25	13.08.25	14.08.25	15.08.25	16.08.25	17.08.25	18.08.25	19.08.25	20.08.25	21.08.25	22.08.25	23.08.25	24.08.25	25.08.25	26.08.25	27.08.25	28.08.25	29.08.25	30.08.25	31.08.25	01.09.25	02.09.25	03.09.25
I, кВт/м^2	0.74	0.67	0.70	0.83	0.77	0.80	0.72	1.10	0.63	0.71	0.92	0.75	0.71	0.80	0.68	0.62	0.75	0.77	0.83	0.67	1.02	0.92	0.56
P, кВт	395.8	390.3	391.9	442.3	411.9	437.7	392.7	512.1	350.1	390.7	445.3	402.3	392.2	436.9	385.4	345.1	396.3	414.8	441.9	386.1	514.8	443.7	214.3

Табл. 4. Мощность и интенсивность солнечного излучения после выпадения осадков
Tab. 4. Power and intensity of solar radiation after precipitation

Показатель	Даты																						
	04.09.25	05.09.25	06.09.25	07.09.25	08.09.25	09.09.25	10.09.25	11.09.25	12.09.25	13.09.25	14.09.25	15.09.25	16.09.25	17.09.25	18.09.25	19.09.25	20.09.25	21.09.25	22.09.25	23.09.25	24.09.25	25.09.25
I, кВт/м^2	0.37	0.28	0.62	0.66	0.59	0.72	0.66	0.74	0.61	0.37	0.63	0.80	0.50	0.92	0.67	0.77	0.61	0.53	0.68	0.45	0.52	0.48
P, кВт	314.8	293.7	413.7	484.3	425.4	512.2	489.1	515.2	448.9	341.5	453.7	558.6	417.3	566.8	488.1	466.3	453.2	419.9	453.2	411.8	419.0	412.7

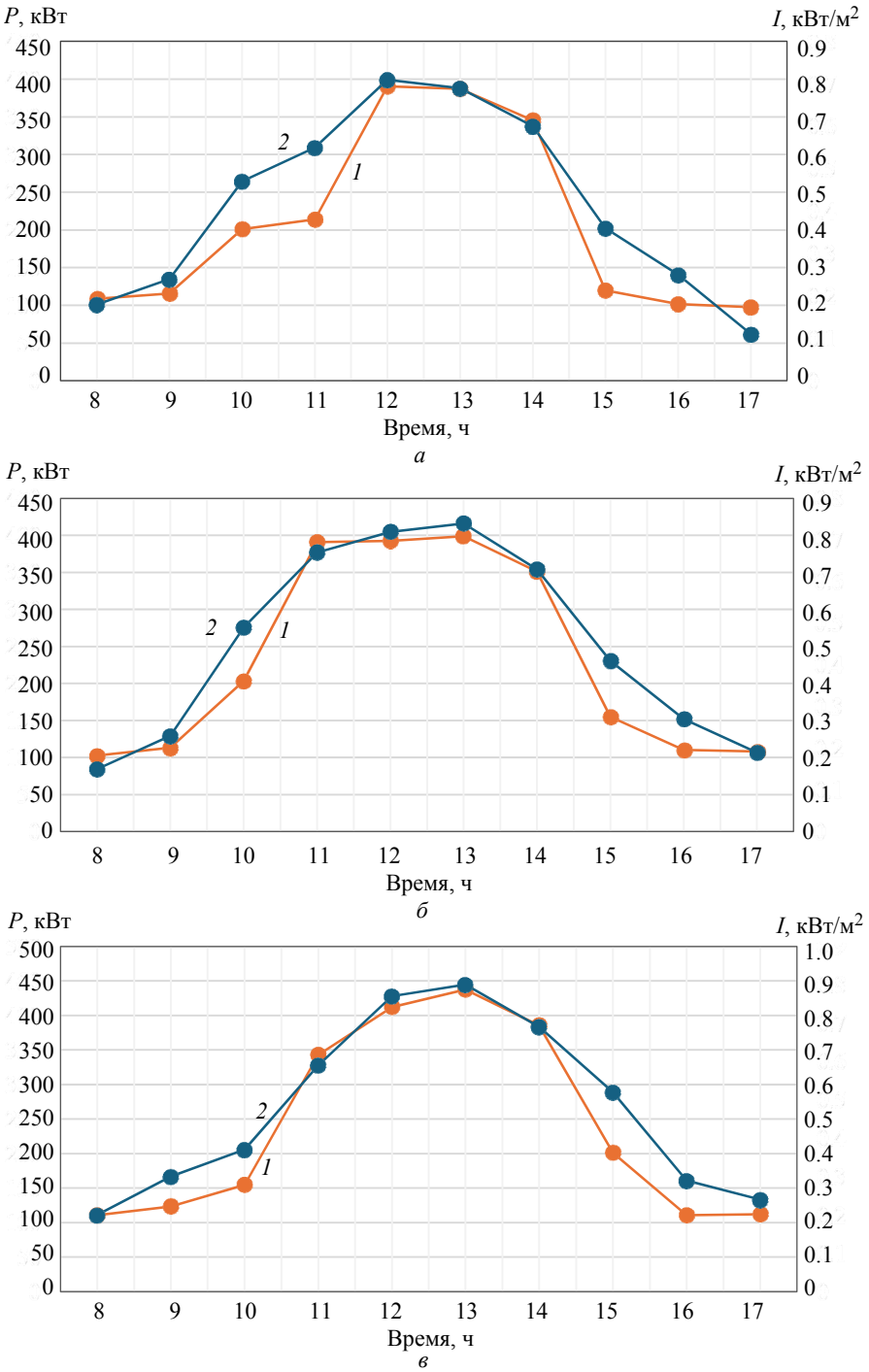


Рис. 4. Мощность (кривая *1*) и интенсивность солнечного излучения (кривая *2*) по датам: *а* – 09.08.25; *б* – 10.08.25; *в* – 11.08.25
Fig. 4. Power (curve *1*) and intensity of solar radiation (curve *2*) by date: *а* – 09.08.25; *б* – 10.08.25; *в* – 11.08.25

На рис. 5 представлена сравнительная динамика мощности, вырабатываемой фотоэлектрической системой, и интенсивности солнечного излучения до и после выпадения осадков. Анализ данных показывает, что до выпадения осадков в период обрастания (с 12 авг. по 3 сент. 2025 г.) средняя выходная мощность составляла 405.85 кВт. После естественной очистки дождем (с 4 по 25 сент. 2025 г.) это значение увеличилось до 433.63 кВт, что соответствует среднему приросту в 27.79 кВт.

Потери мощности, вызванные осаждением пыли, количественно оцениваются с помощью следующего уравнения:

$$\Delta P = \frac{P_{\text{ч}} - P_{\text{г}}}{P_{\text{ч}}} \cdot 100\ \%,$$

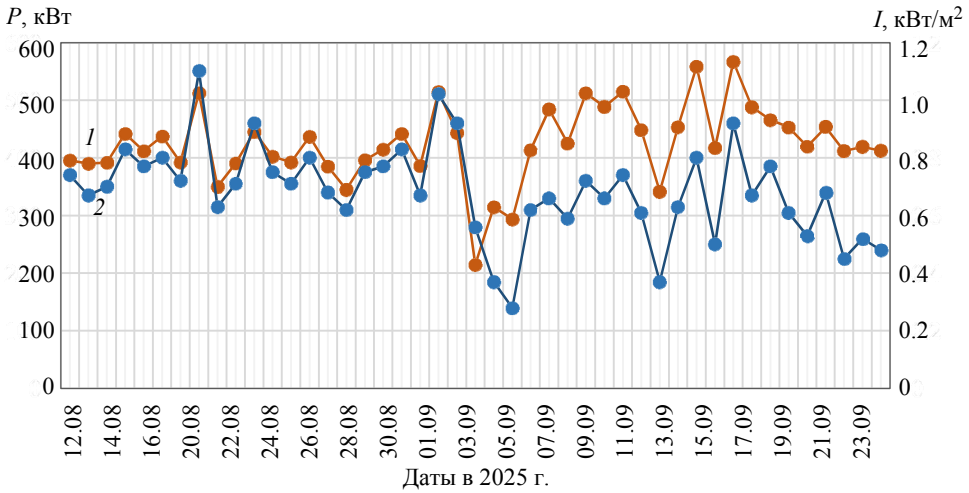


Рис. 5. Изменение мощности, вырабатываемой фотоэлектрической системой (кривая *1*), и интенсивности солнечного излучения (кривая *2*) до и после выпадения осадков
Fig. 5. Change in the power generated by the photovoltaic system (curve *1*) and the intensity of solar radiation (curve *2*) before and after precipitation

где $P_ч$, $P_г$ – мощность чистых и грязных панелей.

Снижение на 6.4 %, наблюдаемое в данном исследовании, подтверждает результаты предыдущих работ, демонстрирующих негативное влияние накопления пыли на производительность фотоэлектрических модулей [5], [11]. Как показывает настоящее исследование, потери мощности различаются в зависимости от места установки: в [1] сообщается о снижении от 3 до 14 %, а в [10] указано конкретное значение 8.8 %, наш результат в 6.4 % попадает в этот диапазон и подчеркивает важность местного экологического контекста при оценке потерь энергии.

Выбор подходящего метода очистки фотоэлектрической системы больницы Университета Каменге. Сравнительный анализ различных методов очистки, представленный в табл. 5, обосновывает окончательный выбор для больничного центра Университета Каменге. Выбор был сделан в пользу системы распыления воды (метод 4, см. табл. 5), поскольку это единственное решение, которое превращает потенциальные недостатки в значительные преимущества, идеально подходящие для местных условий. Климат обеспечивает обильные и эффективные осадки в течение девяти месяцев в году, представляющие естественный ресурс для очистки. Кроме того, существующая инфраструктура уже позволяет собирать эту дождевую воду. Оперативная цель состоит в том, чтобы воспроизвести данный естественный цикл в сухой сезон. Процесс прост: вода собирается с крыш и хранится в течение сезона дождей. Затем она транспортируется по сети труб к насосу. Наконец, она распыляется на фотоэлектрические панели. Таким образом, это решение автоматизирует эффективную очистку, имитируя ливень. Следовательно, оно оказывается наиболее рациональным в данном конкретном контексте, преобразуя локальные данные в стратегические рычаги. Результатом становится экономичное и устойчивое техническое обслуживание. Таким образом, этот метод обеспечивает долгосрочную работоспособность установки.

Заключение. Данное исследование количественно подтвердило значительное негативное влияние накопления пыли на производительность фотоэлектрической системы в университетском больничном центре Каменге в Бурунди. Экспериментальные данные, собранные в течение 48 дней, продемонстрировали прямую корреляцию между чистотой панелей и выходной мощностью. В сухой сезон средняя выходная мощность системы с загрязненными панелями составляла 405.85 кВт, тогда как после естественной очистки дождем это значение достигло 433.63 кВт. Расчетные потери мощности из-за отложения пыли составили 6.4 %, что соответствует значениям, приведенным в международной литературе, и подчеркивает серьезность проблемы в этом регионе. Основной механизм потери эффективности связан с уменьшением тока, генерируемого панелями.

На основе сравнительного анализа девяти методов очистки для университетской больницы Каменге была рекомендована стратегия распыления воды (метод 4 в табл. 5). Этот выбор не универсален, но в данном контексте он оптимален,

Табл. 5. Преимущества и недостатки различных методов очистки
Tab. 5. Advantages and disadvantages of different cleaning methods

Методы очистки	Преимущества	Недостатки
1. Ручная очистка [24]	Тщательная и контролируемая уборка. Визуальная оценка чистоты оператором	Трудоемкий и сложный процесс, особенно для крупных установок. Риски для безопасности оператора (высота). Значительные затраты времени и труда. Риск повреждения панелей (царапины). Использование средств (моющих средств), которые могут изменить поверхность при неправильном применении
2. Натуральное очищение [25]	Абсолютно бесплатно и натурально. Не требует вмешательства человека, энергии или инфраструктуры	Непредсказуемо. Часто недостаточно: дождь может оставлять полосы или отложения и неэффективен против стойких загрязнений
3. Чистка пылесосом [26]	Эффективно удаляет пыль и сухие частицы. Не расходует воду	Часто очистка неполная (труднодоступные углы). Требует ручного вмешательства и обучения. Не очень эффективна против стойких загрязнений (птичий помет, смолы). Накопление пыли в системе может снизить эффективность
4. Системы распыления воды (очистка Heliotex) [27], [28]	Специализированная и часто автоматизированная система. Интеллектуальное управление водой (уровень, давление). Возможность непрерывной подачи воды из водопровода. Эффективно для смывания загрязнений	Высокое потребление воды, ресурса, который иногда бывает дефицитным. Стоимость установки инфраструктуры (резервуар, сеть трубопроводов, насосы). Риск образования известкового налета при жесткой воде
5. Умный робот-уборщик [29], [30]	Автоматизация и регулярность работы без надзора. Максимальное снижение трудозатрат. Автономный источник питания (аккумулятор). Часто без использования воды, экономично и экологично. Частота регулируется в зависимости от потребностей	Очень высокие инвестиционные затраты. Сложная технология, потенциально дорогостоящее техническое обслуживание
6. Воздушная уборка с помощью дронов [27]	Отсутствие физического контакта, отсутствие риска царапин. Идеально подходит для труднодоступных или очень больших объектов. Быстрое развертывание	Высокая стоимость специализированных дронов и их управления/автоматизации. Ограниченная эффективность: наиболее эффективен для легкой пыли, менее эффективен для липкой грязи. Чувствителен к погодным условиям (ветру). Ограниченное время работы от батареи
7. Вибрационная очистка [29], [31]	Автоматизированный и программируемый. Не потребляет воду, не контактирует со стеклянной поверхностью. Простой механизм (вибрационный двигатель)	Ограниченная эффективность: удаляет только рыхлую пыль. Риск длительной механической усталости панелей и их конструкции (постоянные вибрации). Потребление электроэнергии. Потенциальный уровень шума
8. Электростатическая очистка [32], [33]	Бесконтактный метод без использования воды, минимизирующий физический износ панелей. Ресурсоэффективный (без воды, без химикатов)	Риск вибраций, которые могут нарушить крепление панелей к крыше (риск падений и травм, особенно в жилых домах). Вероятные высокие первоначальные затраты (технология и интеграция датчиков и электростатических материалов)
9. Автоматическая очистка [34]	Простой, эффективный и автоматизированный. Значительно снижает трудозатраты. Разработан для очистки без повреждения панелей	Высокие инвестиционные затраты. Потребление воды и энергии. Требуется инфраструктура (водоснабжение, давление)

поскольку превращает основные недостатки метода (высокое потребление воды и затраты на инфраструктуру) в преимущества. Решение заключается в использовании естественного цикла выпадения осадков: сборе и хранении обильных дождевых вод в течение влажного сезона (девять месяцев в году), а затем автоматической подаче и распылении их на панели в сухой сезон. Такой подход имитирует и расширяет эффект естественного очищения, тем самым минимизируя эксплуатационные расходы и зависимость от рабочей силы.

Таким образом, внедрение подходящей системы распыления представляет собой экономически эффективное и устойчивое решение для минимизации потерь энергии, обеспечения рентабельности фотоэлектрической электростанции и поддержания надежного энергоснабжения для критически важного медицинского учреждения.

Список литературы

1. The impact of dust on the efficiency of various photovoltaic panels: An experimental study / T. Aissi, A. Nefraoui, Kh. Kandoussi, R. Elotmani, M. Monkade, Y. Abouel-mahjoub // Solar Energy Advances. 2025. Vol. 5. P. 1–13. doi: 10.1016/j.seja.2025.100106.

2. Experimental and modeling study of dust composition impact on photovoltaic performance in arid coastal environments / A. Almarri, R. AlMutairi, F. Alnass, N. Alghamdi, M. M. Ghobashy, M. S. Attia, M. Madani // J. of Materials Research and Technol. 2025. Vol. 39. P. 5455–5467. doi: 10.1016/j.jmrt.2025.10.169.

3. Determining the optimum tilt angle of solar panels and the energy produced in the different provinces of Burundi / O. Icoyitungiye, D. Bukuru, S. Pritpal, J. B. Niyonzima, N. Ntawuhorakomeye // J. of Power and Energy Engin. 2025. Vol. 13, no. 5. P. 11–35 doi: 10.4236/jpee.2025.135002.

4. Шостак И. В., Коротков В. В., Булыгин Б. А. Влияние загрязненности солнечных панелей на их мощностные характеристики // Вестн. науки. 2024. Т. 3, № 6(75). С. 2169–2175.

5. Кирпичникова И. М., Махсумов И. Б., Шестакова В. В. Снижение генерации электрической энергии солнечными модулями в условиях запыленности местности // iPolytech J. 2023. Т. 27, № 1. С. 83–93. doi: 10.21285/1814-3520-2023-1-83-93.

6. Borah P., Micheli L., Sarmah N. Analysis of soiling loss in photovoltaic modules: A review of the impact of atmospheric parameters, Soil properties, and mitigation approaches // Preprints.org. 2023. Vol. 1. P. 1–27. doi: 10.20944/preprints202310.1177.v1.

7. Étude de l'influence du type de poussière sur la performance des panneaux solaires photovoltaïques à Dakar, Sénégal / A. Dieng, M. C. Aidara, F. Lach-Heb, M. L. Ndiaye // Afrique Sci. 2022. Vol. 21, no. 1. P. 70–81.

8. Effects of dust on the performance of PV panels / Sh. A. Sulaiman, H. H. Hussain, N. S. H. Nik Leh, M. S. I. Razali // Intern. J. of Mechan. and Mechatron. Engin. 2011. Vol. 5, no. 10. P. 2028–2033.

9. The effect of dust deposition on the performance of photovoltaic panels / C. O. Rusănescu, M. Rusănescu, I. A. Istrate, G. A. Constantin, M. Begea // Energies. 2023. Vol. 16, no. 19. P. 6794. doi: 10.3390/en16196794.

10. Environmental impacts on the performance of solar photovoltaic systems / R. J. Mustafa, M. R. Gomaa, M. Al-Dhaifallah, H. Rezk // Sustainability. 2020. Vol. 12, no. 2. P. 608. doi: 10.3390/su12020608.

11. Sisodia A. K. Influence of dust deposition on photovoltaic (PV) module performance at the different sites // Intern. J. of Sci. and Research Archive. 2024. Vol. 13, no. 01. P. 1227–1231. doi: 10.30574/ijsra.2024.13.1.1799.

12. Influence of dust deposition on photovoltaic panel performance / A. Raoa, R. Pillaia, M. Mania, P. Ramamurthya // Energy Proc. Part of Special Iss. 4th Intern. Conf. on Advances in Energy Research (ICAER 2013). Mumbai, India. 2014. Vol. 54. P. 690–700. doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.310.

13. Impact of some environmental variables with dust on solar photovoltaic (PV) performance: Review and research status / Z. A. Darwish, H. A. Kazem, K. Sopian, M. A. Alghoul, M. T. Chaichan // Intern. J. of Energy and Environment. 2013. Vol. 7, no. 4. P. 152–159.

14. Abass K. I., Al-Zubaidi D. S. M., Al-Waeli A. A. K. Effect of pollution and dust on PV performance // Intern. J. of Civil, Mechan. and Energy Sci. (IJCMES). 2017. Vol. 3, no. 4. P. 181–185. doi: 10.24001/ijcmes.3.4.1.

15. Hussain A., Batra A., Pachauri R. An experimental study on effect of dust on power loss in solar photovoltaic module // Renewables: Wind, Water, and Solar. 2017. Vol. 4, no. 1. P. 1–13. doi: 10.1186/s40807-017-0043-y.

16. Adinoyi M. J., Said S. A. M. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules // Renewable Energy. 2013. Vol. 60. P. 633–636. doi: 10.1016/j.renene.2013.06.014.

17. Rajput D. S., Sudhakar K. Effect of dust on the performance of solar PV panel // Intern. J. of ChemTech Research. 2013. Vol. 5, no. 2. P. 1083–1086.

18. Said S. A. M., Walwil H. M. Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance // Solar Energy. 2014. Vol. 107. P. 328–337. doi: 10.1016/j.solener.2014.05.048.

19. Dust effect on the performance of photovoltaic / H. A. Kazem, S. Al-Bahri, S. Al-Badi, H. Al-Mahkladi, A. H. A. Al-Waeli // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 875–877. P. 1908–1911. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.875-877.1908.

20. Mekhilef S., Saidur R., Kamalisarvestani M. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells // Renewable and Sustainable Energy Rev.

2012. Vol. 16, no. 5. P. 2920–2925. doi: 10.1016/j.rser.2012.02.012.

21. Influence of dirt accumulation on performance of PV panels / Sh. A. Sulaiman, A. K. Singhb, M. M. M. Mokhtara, M. A. Bou-Rabee // Energy Proc.: Intern. Conf. on Technol. and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability (TMREES14). 2014. Vol. 50. P. 50–56. doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.006.

22. He G., Zhou Ch., Li Z. Review of self-cleaning method for solar cell array // Proc. Engin.: Intern. Workshop on Automobile, Power and Energy Engin. 2011. Vol. 16. P. 640–645. doi: 10.1016/j.proeng.2011.08.1135.

23. Mejia F., Kleissl J., Bosch J. L. The effect of dust on solar photovoltaic systems // Energy Proc.: SolarPACES. 2013. Vol. 49. P. 2370–2376.

24. Olorunfemi B. O., Ogbolumani O. A., Nwulu N. Solar panels dirt monitoring and cleaning for performance improvement: A systematic review on smart systems // Sustainability. 2022. Vol. 14, no 17. P. 1–27. doi: 10.3390/su141710920.

25. Effects of natural and manual cleaning on photovoltaic output / M. K. Smith, C. C. Wamser, K. E. James, S. Moody, D. J. Sailor, T. N. Rosenstiel // J. of Solar Energy Engin. 2013. Vol. 135, no. 3. P. 1–4. doi: 10.1115/1.4023927.

26. Study on the cleaning and cooling of solar photovoltaic panels using compressed airflow / D. Li, M. King, M. Dooner, S. Guo, J. Wang // Solar Energy. 2021. Vol. 221, no. 1. P. 433–444. doi: 10.1016/j.solener.2021.04.050.

27. Najmi N., Rachid A. A Review on solar panel cleaning systems and techniques // Energies. 2023. Vol. 16, no. 24. Art. 7960. doi: 10.3390/en16247960.

28. Mondal A. K., Bansal K. A brief history and future aspects in automatic cleaning systems for solar photovoltaic panels // Advanced Robotics. 2015. Vol. 29, no. 8. P. 515–524. doi: 10.1080/01691864.2014.996602.

29. Development of intelligent solar panel cleaning robot for enhanced energy efficiency / T. K. H. Patel, N. N. K. Parekh, S. K. D. Parmar, P. K. Patel, A. Purohit, M. Chavda, M. D. Singh, J. B. Balwanshi // Intern. J. of Innovations in Sci. Engin. and Management. 2026. Vol. 5, no. 2. P. 293–303. doi: 10.69968/ijisem.2026v5i2293-303.

30. A solar panel cleaning robot design and application / O. Akyazi, E. Sahin, T. Ozsoy, M. Algul // European J. of Sci. and Technol. 2019. Spec. Iss. P. 343–348. doi: 10.31590/ejosat.638291.

31. Vibration characterization of self-cleaning solar panels with piezoceramic actuation / R. B. Williams, R. Tanimoto, A. Simonyan, S. Fuerstenau // Collection of Techn. Papers 48th Conf. – AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials. 2007. P. 512–520. doi: 10.2514/6.2007-1746. URL: https://www.researchgate.net/publication/268477869_Vibration_Characterization_of_Self-Cleaning_Solar_Panels_with_Piezoceramic_Actuation (дата обращения: 26.12.2025).

32. Automatic solar panel cleaning system / R. P. Kulkarni, M. A. Kadam, T. T. Shinde, N. B. Sonone, A. D. Atalkar. // Intern. J. of Advance Research in Sci. and Engin. 2018. Vol. 7, no. 7. P. 1173–1181.

33. Waterless cleaning technique for photovoltaic panels on dual-axis tracker / D. Dahlioui, S. M. Alaoui, B. Laarabi, A. Barhdadi // Research Square. 2022. P. 1–20. doi: 10.21203/rs.3.rs-1507277/v1.

34. On the role of solar photovoltaics in global energy transition scenarios / Ch. Breyer, D. Bogdanov, A. Gulagi, A. Aghahosseini, L. S. N. S. Barbosa, O. Koskinen, M. Barasa, U. Caldera, S. Afanasyeva, M. Child, J. Farfan, P. Vainikka / Prog. Photovolt: Res. Appl. Vol. 25, no. 8. P. 727–745. doi: 10.1002/PIP.2885.

Информация об авторах

Бизумуремый Жан Поль – аспирант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: bizipaul5@mail.ru

Туркин Дмитрий Николаевич – канд. техн. наук, доцент, зам. зав. кафедрой робототехники и автоматизации производственных систем по научной работе СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: dnturkin@etu.ru

References

1. The impact of dust on the efficiency of various photovoltaic panels: An experimental study / T. Aissi, A. Nefraoui, Kh. Kandoussi, R. Elotmani, M. Monkade, Y. Abouel-mahjoub // Solar Energy Advances. 2025. Vol. 5. P. 1–13. doi: 10.1016/j.seja.2025.100106.

2. Experimental and modeling study of dust composition impact on photovoltaic performance in arid coastal environments / A. Almarri, R. AlMutairi, F. Alnass, N. Alghamdi, M. M. Ghobashy, M. S. Attia, M. Madani // J. of Materials Research and Technol. 2025. Vol. 39. P. 5455–5467. doi: 10.1016/j.jmrt.2025.10.169.

3. Determining the optimum tilt angle of solar panels and the energy produced in the different provinces of Burundi / O. Icoyitungiye, D. Bukuru, S. Pritpal, J. B. Niyonzima, N. Ntawuhorakomeye // J. of Power and Energy Engin. 2025. Vol. 13, no. 5. P. 11–35 doi: 10.4236/jpee.2025.135002.

4. Shostak I. V., Korotkov V. V., Bulygin B. A. Vlijanie zagrjaznennosti solnechnyh panelej na ih moshhnostnye harakteristiki // Vestn. nauki. 2024. T. 3, № 6(75). S. 2169–2175. (In Russ.).

5. Kirpichnikova I. M., Mahsumov I. B., Shestakova V. V. Snizhenie generacii jelektricheskoj jenergii solnechnymi moduljami v uslovijah zapylennosti mestnosti // iPolytech J. 2023. T. 27, № 1. S. 83–93. doi: 10.21285/1814-3520-2023-1-83-93. (In Russ.).

6. Borah P., Micheli L., Sarmah N. Analysis of soiling loss in photovoltaic modules: A review of the impact of atmospheric parameters, soil properties, and mitigation approaches // Preprints.org. 2023. Vol. 1. P. 1–27. doi: 10.20944/preprints202310.1177.v1.

7. Étude de l'influence du type de poussière sur la performance des panneaux solaires photovoltaïques à Dakar, Sénégal / A. Dieng, M. C. Aidara, F. Lach-Heb, M. L. Ndiaye // Afrique Sci. 2022. Vol. 21, no. 1. P. 70–81.

8. Effects of dust on the performance of PV panels / Sh. A. Sulaiman, H. H. Hussain, N. S. H. Nik Leh, M. S. I. Razali // Intern. J. of Mechan. and Mechatron. Engin. 2011. Vol. 5, no. 10. P. 2028–2033.

9. The effect of dust deposition on the performance of photovoltaic panels / C. O. Rusănescu, M. Rusănescu, I. A. Istrate, G. A. Constantin, M. Begea // Energies. 2023. Vol. 16, no. 19. P. 6794. doi: 10.3390/en16196794.

10. Environmental impacts on the performance of solar photovoltaic systems / R. J. Mustafa, M. R. Gomaa, M. Al-Dhaifallah, H. Rezk // Sustainability. 2020. Vol. 12, no. 2. P. 608. doi: 10.3390/su12020608.

11. Sisodia A. K. Influence of dust deposition on photovoltaic (PV) module performance at the different sites // Intern. J. of Sci. and Research Archive. 2024. Vol. 13, no. 01. P. 1227–1231. doi: 10.30574/ijsra.2024.13.1.1799.

12. Influence of dust deposition on photovoltaic panel performance / A. Raoa, R. Pillaia, M. Mania, P. Ramamurthya // Energy Proc. Part of Special Iss. 4th Intern. Conf. on Advances in Energy Research (ICAER 2013). Mumbai, India. 2014. Vol. 54. P. 690–700. doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.310.

13. Impact of some environmental variables with dust on solar photovoltaic (PV) performance: Review and research status / Z. A. Darwish, H. A. Kazem, K. Sopian, M. A. Alghoul, M. T. Chaichan // Intern. J. of Energy and Environment. 2013. Vol. 7, no. 4. P. 152–159.

14. Abass K. I., Al-Zubaidi D. S. M., Al-Waeli A. A. K. Effect of pollution and dust on PV performance // Intern. J. of Civil, Mechan. and Energy Sci. (IJCMES). 2017. Vol. 3, no. 4. P. 181–185. doi: 10.24001/ijcmes.3.4.1.

15. Hussain A., Batra A., Pachauri R. An experimental study on effect of dust on power loss in solar photovoltaic module // Renewables: Wind, Water, and Solar. 2017. Vol. 4, no. 1. P. 1–13. doi: 10.1186/s40807-017-0043-y.

16. Adinoyi M. J., Said S. A. M. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules // Renewable Energy. 2013. Vol. 60. P. 633–636. doi: 10.1016/j.renene.2013.06.014.

17. Rajput D. S., Sudhakar K. Effect of dust on the performance of solar PV panel // Intern. J. of ChemTech Research. 2013. Vol. 5, no. 2. P. 1083–1086.

18. Said S. A. M., Walwil H. M. Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance // Solar Energy. 2014. Vol. 107. P. 328–337. doi: 10.1016/j.solener.2014.05.048.

19. Dust effect on the performance of photovoltaic / H. A. Kazem, S. Al-Bahri, S. Al-Badi, H. Al-Mahkladi, A. H. A. Al-Waeli // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 875–877. P. 1908–1911. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.875-877.1908.

20. Mekhilef S., Saidur R., Kamalisarvestani M. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells // Renewable and Sustainable Energy Rev. 2012. Vol. 16, no. 5. P. 2920–2925. doi: 10.1016/j.rser.2012.02.012.

21. Influence of dirt accumulation on performance of PV panels / Sh. A. Sulaiman, A. K. Singhb, M. M. M. Mokhtara, M. A. Bou-Rabee // Energy Proc.: Intern. Conf. on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability (TMREES14). 2014. Vol. 50. P. 50–56. doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.006.

22. He G., Zhou Ch., Li Z. Review of self-cleaning method for solar cell array // Proc. Engin.: Intern. Workshop on Automobile, Power and Energy Engin. 2011. Vol. 16. P. 640–645. doi: 10.1016/j.proeng.2011.08.1135.

23. Mejia F., Kleissl J., Bosch J. L. The effect of dust on solar photovoltaic systems // Energy Proc.: SolarPACES. 2013. Vol. 49. P. 2370–2376.

24. Olorunfemi B. O., Ogbolumani O. A., Nwulu N. Solar panels dirt monitoring and cleaning for performance improvement: A systematic review on smart systems // Sustainability. 2022. Vol. 14, no 17. P. 1–27. doi: 10.3390/su141710920.

25. Effects of natural and manual cleaning on photovoltaic output / M. K. Smith, C. C. Wamser, K. E. James, S. Moody, D. J. Sailor, T. N. Rosenstiel // J. of Solar Energy Engin. 2013. Vol. 135, no. 3. P. 1–4. doi: 10.1115/1.4023927.

26. Study on the cleaning and cooling of solar photovoltaic panels using compressed airflow / D. Li, M. King, M. Dooner, S. Guo, J. Wang // Solar Energy. 2021. Vol. 221, no. 1. P. 433–444. doi: 10.1016/j.solener.2021.04.050.

27. Najmi N., Rachid A. A Review on solar panel cleaning systems and techniques // Energies. 2023. Vol. 16, no. 24. Art. 7960. doi: 10.3390/en16247960.

28. Mondal A. K., Bansal K. A brief history and future aspects in automatic cleaning systems for solar photovoltaic panels // Advanced Robotics. 2015. Vol. 29, no. 8. P. 515–524. doi: 10.1080/01691864.2014.996602.

29. Development of intelligent solar panel cleaning robot for enhanced energy efficiency / T. K. H. Patel, N. N. K. Parekh, S. K. D. Parmar, P. K. Patel, A. Purohit, M. Chavda, M. D. Singh, J. B. Balwanshi // Intern. J. of Innovations in Sci. Engin. and Management. 2026. Vol. 5, no. 2. P. 293–303. doi: 10.69968/ijisem.2026v5i2293-303.

30. A solar panel cleaning robot design and application / O. Akyazi, E. Sahin, T. Ozsoy, M. Algul // European J. of Sci. and Technol. 2019. Spec. Iss. P. 343–348. doi: 10.31590/ejosat.638291.

31. Vibration characterization of self-cleaning solar panels with piezoceramic actuation / R. B. Williams, R. Tanimoto, A. Simonyan, S. Fuerstenau // Collection of Techn. Papers 48th Conf. – AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials. 2007. P. 512–520. doi: 10.2514/6.2007-1746. URL: https://www.researchgate.net/publication/268477869_Vibration_Characterization_of_Self-Cleaning_Solar_Panels_with_Piezoceramic_Actuation (data obrashhenija: 26.12.2025).

32. Automatic solar panel cleaning system / R. P. Kulkarni, M. A. Kadam, T. T. Shinde, N. B. Sonone, A. D. Atal-

kar. // Intern. J. of Advance Research in Sci. and Engin. 2018. Vol. 7, no. 7. P. 1173–1181.

33. Waterless cleaning technique for photovoltaic panels on dual-axis tracker / D. Dahlioui, S. M. Alaoui, B. Laarabi, A. Barhdadi // Research Square. 2022. P. 1–20. doi: 10.21203/rs.3.rs-1507277/v1.

34. On the role of solar photovoltaics in global energy transition scenarios / Ch. Breyer, D. Bogdanov, A. Gulagi, A. Aghahosseini, L. S. N. S. Barbosa, O. Koskinen, M. Barasa, U. Caldera, S. Afanasyeva, M. Child, J. Farfan, P. Vainikka / Prog. Photovolt: Res. Appl. Vol. 25, no. 8. P. 727–745. doi: 10.1002/PIP.2885.

Information about the authors

Jean Paul Bizumuremyi – postgraduate student of the Department of Robotics and Automation of Production Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: bizipaul5@mail.ru

Dmitry N. Turkin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the Department of Robotics and Automation of Production Systems for Research, Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: dnturkin@etu.ru

Статья поступила в редакцию 20.04.2026; принята к публикации после рецензирования 28.08.2026; опубликована онлайн 27.11.2026.

Submitted 20.04.2026; accepted 28.08.2026; published online 27.11.2026.