



Влияние состава и дисперсности песчаных отложений на электрические параметры фотоэлектрических модулей

Рецензия эксперта на статью получена
12.12.2025 [The expert review of the article
was received on December 12, 2025]

Сегодня установленная мощность солнечных электростанций стремительно растёт, и по прогнозам Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA) ожидается, что к 2030 году доля производства электроэнергии, получаемой за счёт преобразования солнечного излучения, достигнет 13 % в мировом масштабе [1].

Фотоэлектрические модули (ФЭМ) являются ключевым элементом солнечной энергетики, однако их нормальный режим работы в высокой степени зависит от внешних факторов, включая загрязнение поверхности. В регионах с полупустынным и аридным климатом одной из наиболее распространённых форм загрязнения является осаждение песчаных частиц. Такой вид загрязнения блокирует солнечное излучение, что приводит к увеличению отражательной способности поверхности и нарушению равномерного нагрева как всего модуля, так и локальных участков (ячеек). Все эти последствия в итоге приводят к ускорению процесса деградации модуля, а также снижению генерируемой мощности [2].

Характер влияния песчаных отложений на генерацию ФЭМ определяется не

только интенсивностью осаждения, но и физико-химическим составом самих частиц — в первую очередь их минеральным составом и степенью дисперсности (раздробленности). Чем выше степень дисперсности, тем больше удельная поверхность вещества, которая приходится на единицу объёма.

В данной работе рассматриваются два типичных вида песчаных отложений: кварцевый песок, характеризующийся высокой однородностью минерального состава и чистотой, и карьерный песок, представляющий полидисперсную смесь с наличием глинистых примесей и других минералов.

В контексте загрязнения поверхности фотоэлектрического модуля важно проводить разграничение между частицами песка и пылью, поскольку эти категории аэрозольных загрязнителей отличаются по происхождению, свойствам, а самое главное — размеру. В литературе по данному направлению чаще всего рассматривается пылевое осаждение.

Под пылью обычно понимают мелкодисперсные твёрдые частицы с диаметром менее 63 мкм, согласно классификации ГОСТ Р 14688-1-2017 [3].

УДК 621.383. Научная специальность: 2.4.5.

Влияние состава и дисперсности песчаных отложений на электрические параметры фотоэлектрических модулей

Виктор Алексеевич Серов, аспирант, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» («ЭССиСЭ»), Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ, г. Челябинск); **Ирина Михайловна Кирпичникова**, д.т.н., профессор, кафедра «ЭССиСЭ», ЮУрГУ (г. Челябинск)

В статье рассматривается влияние минерального состава и распределения песчаных отложений на электрические параметры фотоэлектрического модуля. В ходе эксперимента на модуле были распределены два типа песка — карьерный и кварцевый — и зафиксированы вольт-амперные характеристики. По полученным характеристикам определена точка максимальной мощности. Установлено, что загрязнение карьерным песчаным составом приводит к снижению точки максимальной мощности на 17,32 %, в то время как кварцевый песок вызывает падение на 35,51 %. Результаты показывают, что состав и распределение песчаных отложений оказывают существенное влияние на электрические параметры модуля, что подчёркивает важность данной темы для оптимизации работы солнечных электростанций.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, песчаные отложения, загрязнение поверхности, вольт-амперная характеристика.

UDC 621.383. Scientific specialty number: 2.4.5.

Influence of the composition and dispersion of sand deposits on the electrical parameters of photovoltaic modules

Viktor Al. Serov, postgraduate student, the Department of Electric Power Plants, Networks and Power Supply Systems (ESSE), South Ural State University (National Research University) (NRU SUSU, Chelyabinsk city); **Irina M. Kirpichnikova**, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Department of ESSE, NRU SUSU (Chelyabinsk city)

The article examines the effect of the mineral composition and distribution of sand deposits on the electrical parameters of the photovoltaic module. During the experiment, two types of sand were distributed on the module — quarry and quartz, and volt-ampere characteristics were recorded. Based on the obtained characteristics, the maximum power point is determined. It was found that contamination by quarry sand composition leads to a decrease in the maximum power point by 17.32 %, while quartz sand causes a drop of 35.51 %. The results show that the composition and distribution of sand deposits have a significant impact on the electrical parameters of the module, which underlines the importance of this topic for optimizing the operation of solar power plants.

Key words: photovoltaic module, sand deposits, surface contamination, volt-ampere characteristic.



•• Фотоэлектрическая панель Jingyang 100W с ETFE-покрытием

Пыль может включать в себя различные примеси, такие как минералы глины, органические остатки, сажу и другие компоненты. Из-за малых размеров и электростатических взаимодействий она часто обладает высокой адгезией к поверхности [4].

В последние годы влиянию осаждения пыли на поверхности ФЭМ уделяется всё больше внимания, исследование [5] демонстрирует, что слой пыли в 1 мкм может привести к снижению производительности модуля на 25,5%. Стоит отметить, что активно развиваются фундаментальные исследования по механизмам осаждения ввиду сложности моделирования. Процесс осаждения зависит от множества факторов таких как скорость ветра, влажность, размер и состав частиц, угла наклона ФЭМ и др. [6].

Песчаные частицы, относятся уже к более крупной фракции осадочных отложений, с диаметром от 63 мкм до 2 мм, которые преимущественно имеют мине-

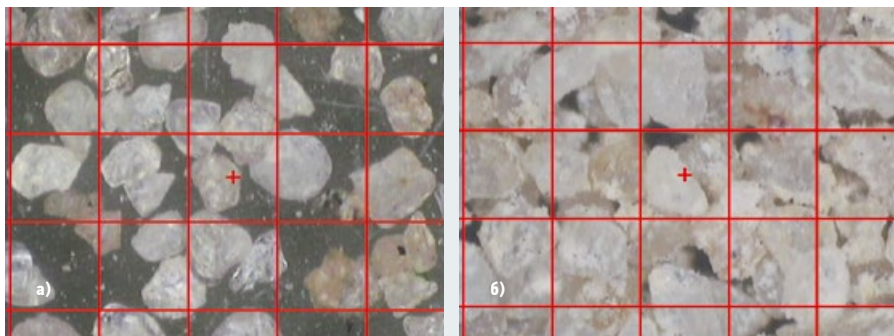
ральное происхождение и характеризуются низкой способностью к удержанию на наклонных поверхностях без внешнего воздействия. По сравнению с пылью, частицы песка вносят вклад в затенение в первую очередь за счёт макроскопического блокирования солнечного света, а не за счёт формирования сплошной плотной плёнки как с пылью.

Стоит отметить, что во многих климатических зонах (включая умеренные и тропические) загрязнение ФЭМ происходит не в сухом виде, а с присутствием влаги, которая сопровождается утренней росой, туманом, дождём с последующим высыханием. Влага в этом случае значительно усиливает адгезию загрязняющих частиц к поверхности модуля, особенно мелкодисперсные фракции [7, 8]. Это приводит к образованию более стойких отложений, которые будет тяжелее удалить естественным (дождь, ветер) или даже механическим способом.

•• Паспортные данные фотоэлектрического модуля BSP 32-100

табл. 1

Параметр	Значение
Напряжение холостого хода U_{xx} , В	19,2
Ток короткого замыкания $I_{кз}$, А	6,68
Напряжение в точке максимальной мощности $U_{мм}$, В	16
Ток в точке максимальной мощности $I_{мм}$, А	6,25
Температурный коэффициент по току K_I , %/°C	0,036
Температурный коэффициент по напряжению K_U , %/°C	-0,31



•• Рис. 1. Рассматриваемые опытные образцы (а — кварцевый песок, б — карьерный песок)

Целью исследования является количественная оценка влияния минерального состава песчаных отложений на электрические параметры поликристаллического ФЭМ в полевых условиях. В частности, проведение сравнительного анализа снижения точки максимальной мощности при загрязнении карьерным и кварцевым песчаным составом, нанесённым на влажную поверхность модуля для выявления связи между типом загрязнителя и параметрами работы ФЭМ.

Методы и ход работы

Для имитации типичных природных условий, при которых осаждение песчаных частиц происходит на влажную поверхность (например, после утренней росы или дождя), образцы массой по 50 г наносились на предварительно увлажнённую поверхность ФЭМ.

В качестве исследуемого образца использовался поликристаллический фотоэлектрический модуль BSP 32-100 производителя Jingyang PV, параметры которого представлены в табл. 1. Во время всех испытаний модуль устанавливался под углом 55,3° (что соответствует географической широте города Челябинска). Стоит отметить, что электрическая схема рассматриваемого ФЭМ была разделена на две секции по 16 ячеек и для каждой секции поставлен шунтирующий диод с рабочим током до 15 А для имитации работы двух модулей. Температура воздуха составляла 16°C, уровень солнечной инсоляции изменялся в диапазоне 470–480 Вт/м². Скорость ветра была равна нулю.

На рис. 1 представлены два опытных песчаных образца в пятикратном увеличении. Квадратная ячейка соответствует размеру 0,280×0,280 мм. Как видно из рис. 1, карьерный состав отличается наличием глиняной примеси. Размер частиц карьерного песка в среднем составляет 0,284 мм, в то время как кварцевый песок отличается своей чистотой и средним размером частиц, равным 0,211 мм.

Ход работы:

1. Фиксирование контрольной ВАХ.
2. Нанесение первого состава на влажную поверхность по всей площади модуля.
3. Фиксирование ВАХ.
4. Хаотичное (частичное) нанесение состава.
5. Фиксирование ВАХ.
6. Смывание всего состава с поверхности без дополнительных механических средств и ожидание полного высыхания (имитация дождя в полевых условиях).
7. Фиксирование ВАХ.

Все пункты также повторяются и для второго образца.

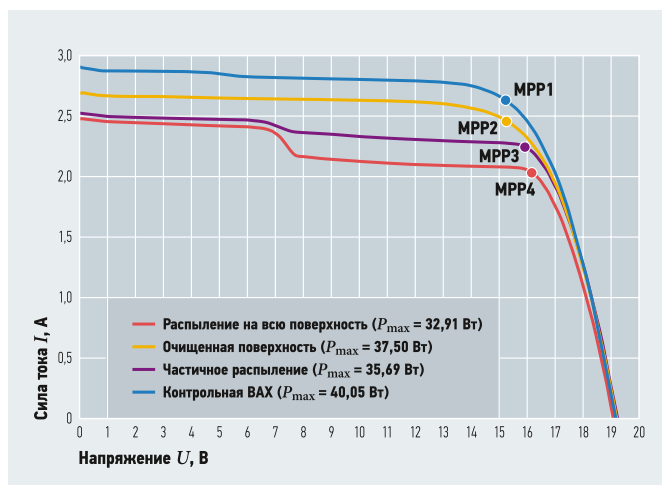


Рис. 2. ВАХ при нанесении карьерного песка на поверхность ФЭМ

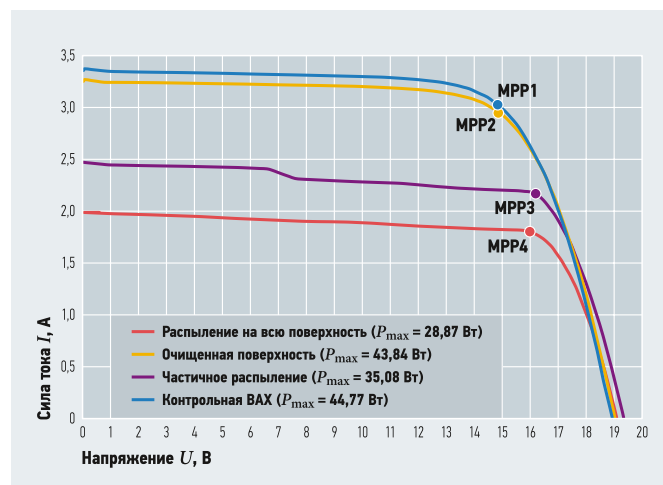


Рис. 3. ВАХ при нанесении кварцевого песка на поверхность ФЭМ

Результаты

На рис. 2 представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) при нанесении карьерного песка для рассматриваемых этапов с указанием точки максимальной мощности (Maximum Power Point, MPP) каждой характеристики. Из рис. 2 видно, что наличие примеси глины влияет на адгезию остаточных частиц к поверхности после полной очистки. Происходит снижение значения точки максимальной мощности с 40,05 Вт (контрольная ВАХ) до 37,5 Вт. Наличие ступени на характеристике при распылении на всю поверхность объясняется тем, что слой неравномерен.

На рис. 3 представлена ВАХ с нанесением кварцевого песка. Из рис. 3 видно, что в этой ситуации (кварцевый песок) после полной очистки песка, ввиду отсутствия примесей, выходная мощность снизилась не так существенно (на 0,93 Вт) по сравнению с карьерным песком (на 2,55 Вт). По форме характеристик с кварцевым песком можно сказать, что благодаря меньшей массе и размеру частиц распределение происходит равномерно, в связи с этим наблюдается сильное снижение значения точки максимальной мощности (на 15,9 Вт) по сравнению с карьерным песком, где оно составило 7,14 Вт при условии нанесения образцов на всю поверхность.

Неоднородность поведения частиц разного состава можно объяснить следующим образом. Кварцевый песок в чистом виде по своему составу гидрофобен, но его поверхность может быть частично

гидрофильной из-за микротрещин и наличия различных примесей. В составе карьерного песка, как правило, содержатся глиняные примеси и минералы, которые являются гидрофильными и при увлажнении могут набухать, образовывать плёнки. Полученные параметры фотоэлектрического модуля по ВАХ для двух составов представлены в табл. 2.

Данные результаты могут быть полезны для разработки рекомендаций по составлению планов технического обслуживания ФЭМ на солнечных электростанциях в условиях повышенного накопления песчаных частиц на поверхности модулей, а также для модернизации систем очистки с учётом специфики местных климатических условий.

Заключение

В ходе полевых экспериментов с поликристаллическим ФЭМ при естественном освещении показано, что минеральный состав песчаных отложений оказывает влияние на электрические показатели модуля. При одинаковой массе загрязнения (50 г) и нанесении на влажную поверхность карьерный песок вызвал снижение значения точки максимальной мощности на 17,32%, в то время как кварцевый песок вызывает падение на 35,51 % при нанесении на всю поверхность модуля. Полученные результаты подтверждают, что не только количество, но и тип минеральных отложений оказывают различное влияние на электрические показатели ФЭМ.

Отложение песчаных частиц в основном приводит к локальному затенению участков ФЭМ, интенсивность которого зависит от размера и плотности отложений. Также определено, что дисперсность частиц играет важную роль, в данном случае у кварцевого состава она выше, чем у карьерного. При нанесении происходит образование равномерного слоя, который препятствует проникновению солнечных лучей подобно затенению.

Будущие направления исследований могут быть сосредоточены на экспериментах для различных климатических условий по осаждению пылевых / песчаных частиц. Безусловно, проведение реального отбора проб и анализа пыли на поверхности фотоэлектрических панелей в различных регионах и на различных типах ФЭМ в реальных условиях будет иметь большую ценность. ●

Электрические параметры ФЭМ при разных этапах испытаний

табл. 2

Этапы / состав	Карьерный песок			Кварцевый песок		
	$I_{кз}, А$	$U_{хх}, В$	$P_{max}, Вт$	$I_{кз}, А$	$U_{хх}, В$	$P_{max}, Вт$
Распыление на всю поверхность	2,47	19,09	32,91	1,99	19,09	28,87
Частичное распыление	2,52	19,24	35,69	2,48	19,34	35,08
Очищенная поверхность	2,67	19,19	37,50	3,25	19,01	43,84
Контрольная ВАХ	2,91	19,16	40,05	3,35	18,93	44,77

- Letting in the Light: How solar photovoltaics will revolutionise the electricity system. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi, UAE. Web-source: irena.org. Access data: 21.10.2025.
- Кирпичникова И.М., Серов В.А. К вопросу решения проблемы загрязнения солнечных модулей // Энергосбережение и водоподготовка, 2024. №2. С. 42–49.
- ГОСТ Р ИСО 14688-1–2017. Геотехнические исследования и испытания. Идентификация и классификация грунтов. Ч. 1: Идентификация и описание / Дата введ.: 01.07.2018.
- Agbogla J., Sekyere C.K.K., Forson E.K., Opoku R., Baah B. Soiling estimation methods in solar photovoltaic systems: Review, challenges and future directions. Results in Engineering. 2025. Vol. 26. No. 104810.
- Wang J., Hu W., Wen Y., Zhang F., Li X. Dust deposition characteristics on photovoltaic arrays investigated through wind tunnel experiments. Scientific Reports. 2025. Vol. 15. No. 1582.
- Younis A., Alhorr Y. Modeling of dust soiling effects on solar photovoltaic performance: A review. Solar Energy. 2021. Vol. 220. Pp. 1074–1088.
- 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. Sustainability. 2023. Vol. 15. Issue 24. No. 16669.
- Ilse K.K., Figgis B.W., Naumann V., Hagendorf Ch., Bagdahn J. Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 98. Pp. 239–254.

References — see page 80.

Influence of the composition and dispersion of sand deposits on the electrical parameters of photovoltaic modules. Pp. 73–75.

Viktor A. Serov, postgraduate student, the Department of Electric Power Plants, Networks and Power Supply Systems (ESSE), South Ural State University (National Research University) (NRU SUSU, Chelyabinsk); **Irina M. Kirpichnikova**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of ESSE, NRU SUSU

1. Letting in the Light: How solar photovoltaics will revolutionise the electricity system. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi, UAE. Web-source: irena.org. Access data: 21.10.2025.
2. I.M. Kirpichnikova, V.A. Serov. *K voprosu resheniya problemy zagryazneniya solnechnykh modulej* [On the issue of solving the problem of contamination of solar modules]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy Saving and Water Treatment]. 2024. No. 2. Pp. 42–49. [In Russian]
3. GOST R ISO 14688-1–2017 [The State Industry Standard of Russia No. 14688-1–2017]. *Geotekhnicheskie issledovaniya i ispytaniya. Identifikatsiya i klassifikatsiya gruntov. Ch. 1: Identifikatsiya i opisanie* [Geotechnical investigations and testing. Identification and classification of soils. Part 1: Identification and description]. Date of impl.: July 1, 2018. [In Russian]
4. J. Agbogla, C.K.K. Sekyere, F.K. Forson, R. Opoku, B. Baah. Soiling estimation methods in solar photovoltaic systems: Review, challenges and future directions. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. No. 104810.
5. J. Wang, W. Hu, Y. Wen, F. Zhang, X. Li. Dust deposition characteristics on photovoltaic arrays investigated through wind tunnel experiments. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. No. 1582.
6. A. Younis, Y. Alhorr. Modeling of dust soiling effects on solar photovoltaic performance: A review. *Solar Energy*. 2021. Vol. 220. Pp. 1074–1088.
7. P. Borah, L. Micheli, N. Sarmah. Analysis of soiling loss in photovoltaic modules: A review of the impact of atmospheric parameters, soil properties, and mitigation approaches. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Issue 24. No. 16669.
8. K.K. Ilse, B.W. Figgis, V. Naumann, Ch. Hagendorf, J. Bagdahn. Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 98. Pp. 239–254.