



## СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

## SOLAR ENERGY

ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

SOLAR ENERGY UNITS

Статья поступила в редакцию 09.08.17. Ред. рег. № 1077-2145-3-SM The article has entered in publishing office 09.08.17. Ed. reg. No. № 1077-2145-3-SM

УДК 620.92

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЗАГРЯЗНЕНИЙ  
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ  
ЭНЕРГОУСТАНОВОК В МОСКВЕ\*****Ю.Г. Коломиец<sup>1</sup>, А.Б. Тарасенко<sup>1</sup>, В.В. Тебуев<sup>2</sup>, М.Ж. Сулейманов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН  
стр. 2, д. 13, ул. Ижорская, Москва, 125412, Россия  
тел.: +7(495)485-93-90; e-mail: KolomietsYG@gmail.com  
<sup>2</sup>МГУ имени М.В.Ломоносова, географический факультет  
ГСП-1, Ленинские горы, Москва, 119991, Россия

doi: 10.15518/isjaee.2018.04-06.012-024

Заключение совета рецензентов: 05.09.17 Заключение совета экспертов: 12.10.17 Принято к публикации: 15.12.17

В условиях мегаполиса одним из самых значимых факторов снижения выработки электроэнергии фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) является загрязнение их поверхностей. В работе проведен анализ различных литературных источников по видам загрязнений и их влиянию на работу ФЭП, а также методов борьбы с этими загрязнениями. Основными источниками загрязнения солнечных установок являются: частицы почвы; птичий помет; листья; снег; загрязнители воздуха, поступающие от промышленных предприятий; различные виды пыли, связанные с деятельностью человека; выбросы от автомобильного транспорта и т.д. Анализ этих работ показал, что производительность ФЭП снижается в первую очередь из-за углеродного загрязнения, далее – из-за почвенных частиц и частиц карбоната кальция.

В рамках настоящей работы проведено экспериментальное исследование влияния различных видов загрязнений на эффективную эксплуатацию солнечных энергоустановок в Москве. Серия экспериментов была поставлена в осенне-зимний период, в основном в условиях низкой инсоляции. Один из ФЭП при каждом эксперименте был покрыт слоем пыли (зола, снега), второй (контрольный) – очищен. Температура воздуха составляла 0–2 °С. Каждый эксперимент длился 60–90 мин. Кроме того, перед основной серией экспериментов осуществлялась верификация как чистых модулей, так и одновременно загрязненных. Экспериментальные исследования проводились для следующих типов загрязнения: пыль, зола и снег. В результате эксперимента были сделаны следующие выводы. Средняя погрешность измерения чистых модулей составляет 3 %, что согласуется с паспортными данными самих установок. Сухое запыление в Москве не играет существенной роли для выработки ФЭП. Влажное запыление углеродными частицами является главным источником снижения выработки электроэнергии на ФЭП (до 30 %). Оснежнение приводит к существенному снижению расчетных значений мгновенного КПД модулей (свыше 10 %). При низких значениях инсоляции происходит резкий рост погрешности измерений производительности ФЭП.

Ключевые слова: солнечная энергетика; фотоэлектрический преобразователь (ФЭП); загрязнение; пыль; сажа; снег.

\*Коломиец Ю.Г., Тарасенко А.Б., Тебуев В.В., Сулейманов М.Ж. Исследование влияния различных видов загрязнений на эффективность эксплуатации солнечных энергоустановок в Москве // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(04-06):12-24.



## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF VARIOUS POLLUTION TYPES ON OPERATIONAL EFFICIENCY OF SOLAR POWER INSTALLATIONS IN MOSCOW

Y.G. Kolomiets<sup>1</sup>, A.B. Tarasenko<sup>1</sup>, V.V. Tebuev<sup>2</sup>, M.J. Suleymanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences  
Bd. 2, 13 Izhorskaya St., Moscow, 125412, Russia  
tel.: +7 (495) 485 93 90, e-mail: KolomietsYG@gmail.com

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography  
GSP-1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

doi: 10.15518/isjaee.2018.04-06.012-024

Referred 5 September 2017 Received in revised form 12 October 2017 Accepted 15 December 2017

One of the most significant factors in the megapolis environment in reducing the electricity generation from photoelectric converters (PV) is the contamination of their surfaces. The paper carries out the analysis of various literature sources on the types of pollution and their effect on the operation of the PV, and also the methods for dealing with pollution. The main contamination sources of solar installations are shown to be the soil particles, bird droppings, leaves, snow, air pollutants coming from industrial enterprises, various types of dust associated with human activities, emissions from road transport, etc. The analysis of these studies has indicated that the productivity of the PV is reduced primarily due to carbon contamination, then due to soil particles and calcium carbonate particles.

We carried out an experimental study of the influence of various pollution types on the operational effective of solar power plants in Moscow. A series of experiments was carried out in the autumn-winter period, under conditions primarily of low insolation. We covered one of the PV with a layer of dust (ash, snow) at each experiment, the second one (the control one) – was cleaned. The air temperature was 0–2 °C. Each experiment was conducted for 60–90 min. In addition, before the main series of experiments, we have verified the clean modules, and with their simultaneous contamination. Experimental studies were conducted for the following types of pollution – dust, ash and snow. The experiment showed that: The average error in measuring pure modules is 3% that is consistent with the passport data of the installations. Dry dust in Moscow does not play a significant role in the development of the PV. Wet dust by carbon particles is the main source of reduced power generation by PV (up to 30%). Snowfall leads to a significant decrease in the calculated values of the instantaneous efficiency of modules (over 10%). At low values of insolation, there is a sharp increase in the error in measuring the productivity of the PV.

Keywords: solar power; photoelectric converter (PV); pollution; dust; soot; snow.



Юлия Георгиевна  
Коломиец  
Yulia Kolomiets

**Сведения об авторе:** канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии ОИВТ РАН.

**Образование:** электроэнергетический факультет МЭИ (ТУ) (2004 г.); аспирантура ОИВТ РАН (2007 г.).

**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии; оценка ресурсов ВИЭ; экономика возобновляемой энергетики.

**Публикации:** более 30, в том числе патенты.

*h*-index (по РИНЦ): 7

Researcher ID: D-6102-2014

SPIN-код: 7695-1191

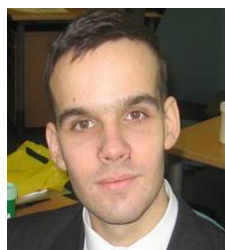
Идентификатор ученого в ИС Карта российской науки: 00016152

**Information about the author:** Ph.D. in Engineering, Scientific Worker at Renewable Energy Sources Laboratory of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

**Education:** Moscow Power Engineering Institute, the Electricity Department, 2004; postgraduate study in JIHT of RAS, 2007.

**Research interests:** renewable energy sources; assessment of renewable energy resources; renewable energy economy.

**Publications:** more than 30 including patents.



Алексей Борисович  
Тарасенко  
Alexey Tarasenko

**Сведения об авторе:** научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии ОИВТ РАН.

**Образование:** Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (2005 г.).

**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии; фотопреобразователи; накопители энергии.

**Публикации:** более 40, в том числе патенты.

*h*-index (по РИНЦ) 6

Researcher ID: E-2683-2014

SPIN-код: 6346-1356

Идентификатор ученого в ИС Карта российской науки: 00020379

**Information about the author:** Scientific Worker at Renewable Energy Sources Laboratory of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

**Education:** National Research Nuclear University MEPH, 2005.

**Research interests:** renewable energy sources; PV; energy stores.

**Publications:** more than 40 including patents.



Владимир  
Владимирович Тебеев  
Vladimir Tebuev

**Сведения об авторе:** инженер лаборатории НИЛ ВИЭ географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

**Образование:** Московский авиационный институт (МАИ) (2001 г.).

**Область научных интересов:** источники электроэнергии, в т.ч. возобновляемые; энергосбережение и рекуперация.

**Публикации:** 8, в том числе 5 патенты.  
h-index (по РИНЦ): 2

**Information about the author:** Engineer at the Research Laboratory of the Geographical Faculty of the Lomonosov Moscow State University.

**Education:** Moscow Aviation Institute (MAI), 2001.

**Research interests:** energy sources including renewable sources; energy economy and recuperation.

**Publications:** more than 8 including 5 patents.



Муси Жамалутдинович  
Сулейманов  
Musi Suleymanov

**Сведения об авторе:** канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии ОИВТ РАН.

**Образование:** Дагестанский государственный педагогический университет, физический факультет (2002 г.); аспирантура ОИВТ РАН (2007 г.).

**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии; оценка ресурсов ВИЭ; экономика возобновляемой энергетики.

**Публикации:** более 30, в том числе патенты.  
h-index (по РИНЦ) 3

Researcher ID: D-3322-2014

SPIN-код: 2220-1227

Идентификатор ученого в ИС Карта российской науки: 00015729

**Information about the author:** Ph.D. in Engineering, Scientific Worker at Renewable Energy Sources Laboratory of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

**Education:** Dagestan State Pedagogical University, 2002; postgraduate study in IJHT of RAS, 2007.

**Research interests:** renewable energy sources; assessment of renewable energy resources; renewable energy economy.

**Publications:** more than 30 including patents

## Введение

Развитие технологий энергетического использования возобновляемых источников энергии, прежде всего повсеместно доступной солнечной энергии, обеспечило расширение масштабов применения автономных систем улично-дорожного освещения, электропитания светофоров, дорожных знаков и т.п. в разных странах мира. Сейчас в Москве действуют порядка 1,5 тысяч фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), от которых работают такие установки, как паркоматы, велопарковки, светофоры, уличные и дворовый фонари, Wi-Fi станции [1].

Данные системы являются весьма актуальными для Москвы, поскольку, в частности, территория Москвы по суммам поступающей солнечной радиации практически не уступает европейским странам (среднегодовая дневная сумма суммарной солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, составляет около 2,8 кВтч/(м<sup>2</sup>·день), летом дневные суммы превышают 5,2 кВтч/(м<sup>2</sup>·день)) [2].

В рамках настоящей работы рассматривалось влияние одного из самых значимых в условиях мегаполиса факторов снижения выработки электроэнергии ФЭП – загрязнение поверхностей преобразователей.

Влияние различных видов загрязнений на эффективную эксплуатацию солнечных энергоустановок изучалось в ряде исследований [3–11], однако практически все эксперименты проходили в условиях ясного неба и высоких значений солнечной радиации. В предлагаемой работе экспериментальные исследования по следующим видам загрязнений: пыль, зола и снег – проводились в условиях облачности, которая характерна для осенне-зимнего периода в Москве. Кроме того, с целью снижения погрешности получаемых результатов каждый эксперимент длился в течение часа с записью данных каждые 10 с, в то время как скважность измерений, представленных в других работах, обычно составляет порядка 10 мин [3–5]. Это позволило более точно определить изменение эффективности работы ФЭП при одновременном измерении уровня падающей солнечной радиации.

## Список обозначений

### Аббревиатуры

MPPT	Максимально возможная мощность на выходе (maximum power point tracking)
ШИМ	Широтно-импульсная модуляция
ФЭП	Фотоэлектрический преобразователь



## Теоретические основы влияния загрязнения на работу солнечных энергоустановок

### Классификация загрязнений и их влияние на работу ФЭП

Загрязнение – это осаждение грязи на солнечные модули, которое снижает количество солнечной радиации, достигающей солнечных батарей, и приводит к снижению генерации электроэнергии.

Загрязнение может быть вызвано как естественными природными источниками, так и деятельностью человека.

#### 1. Загрязнения от природных источников:

- песок и частицы почвы, перемещаемые ветром;
- птичий помет;
- пыльца;
- опавшие листья, перемещаемые ветром и прилипающие к поверхности модуля ФЭП;
- снег.

#### 2. Загрязнения, возникающие в результате деятельности человека:

- загрязнители воздуха, поступающие от промышленных предприятий (сажа и т.д.);
- пыль и другие загрязнители воздуха, вызванные сельскохозяйственной деятельностью (обработка почвы, опрыскивание, сбор урожая);
- пыль, образующаяся при движении по грунтовой дороге;
- загрязнение выбросами от автомобильного транспорта (резиновая пыль, сажа и т.д.);
- продукты сгорания от традиционных систем отопления жилых помещений.

Загрязнения классифицируются и по расположению на солнечной панели:

1) Локальное загрязнение (рис. 1), причиной которого является главным образом птичий помет. Такое загрязнение может вызвать резкое снижение электрической мощности панели, поскольку активная поверхность модулей солнечных элементов соединена последовательно.



Рис. 1 – Локальное загрязнение ФЭП [6]  
Fig. 1 – Local contamination of the PV [6]

2) Поверхностное загрязнение (рис. 2), при котором загрязнители распределены по всей поверхности солнечного модуля на совокупной основе. Ввиду разнообразия, источники загрязнения и за-

грязняющих веществ могут наслаиваться друг на друга и оказывать дополнительный негативный эффект на выработку электрической мощности.



Рис. 2 – Поверхностное загрязнение ФЭП  
Fig. 2 – Surface contamination of the PV



3. Накопление грязи в углах солнечной панели (рис. 3).



**Рис. 3 –** Накопление грязи в углах солнечной панели [7]  
**Fig. 3 –** Accumulation of dirt in the corners of the solar panel [7]



Наиболее распространенным видом загрязнения является пыль, которая может состоять из смеси различных загрязняющих веществ, типичных для конкретной географической области. Термин «пыль» является общим для любого диаметра твердых частиц менее 500 мкм. Важными характеристиками пыли являются размер и распределение ее частиц, плотность, форма, химический состав и т.д. Размер и форма частиц пыли, а также скорость накопления пыли зависит от географического положения, климатических условий и степени урбанизации конкретного места. Основными условиями окружающей среды, которые могут повлиять на производительность и поведение пыли, являются влажность воздуха, скорость и направление ветра [8–10].

До настоящего времени были проведены широкие исследования влияния пыли на энергетическую эффективность солнечных модулей [3–6, 10–15]. В результате был сделан вывод о том, что все виды пыли могут отрицательно влиять на эффективность использования энергии солнечными модулями, но наибольшее влияние оказывают золы, известняк (карбонат кальция) и песок [3].

В одном из первых исследований о влиянии пыли на энергетическую эффективность фотоэлектрических систем [11] были использованы три типа лабораторных моделей пыли, которые часто присутствуют в атмосфере, – известняк, цемент и уголь. В этом исследовании было показано, что ухудшение характеристик фотоэлектрического модуля зависит не только от осаждения пыли, но и от типа пыли и распределения ее частиц по размерам. Так, накопление тонкой пыли (30 мкм) на поверхности солнечных модулей имеет гораздо большее отрицательное влияние на их производительность, чем накопление грубой пыли (100 мкм). Это связано с тем, что тон-

чайшие частицы пыли распределены более равномерно, поэтому пространство между частицами, через которые может проходить свет, в более тонкой пыли меньше, чем между частицами крупнозернистой пыли. Кроме того, было отмечено, что тип пыли также определяет снижение производительности солнечных модулей: например, углеродные частицы поглощают солнечное излучение более интенсивно, чем известняк и цемент [3]. Согласно [3], у загрязненного углеродной пылью модуля выработка электроэнергии снизились в среднем на 37,8 % по сравнению с чистым солнечным модулем; у загрязненного карбонатом кальция – на 6,7 %; у загрязненного частицами почвы – на 7,3 %. На основании этих результатов можно сделать вывод о том, что максимальное влияние на производительность ФЭП оказывает углеродное загрязнение, затем почвенные частицы и минимальное – карбонат кальция.

Отдельно можно выделить такой вид загрязнений, как снег [16–18].

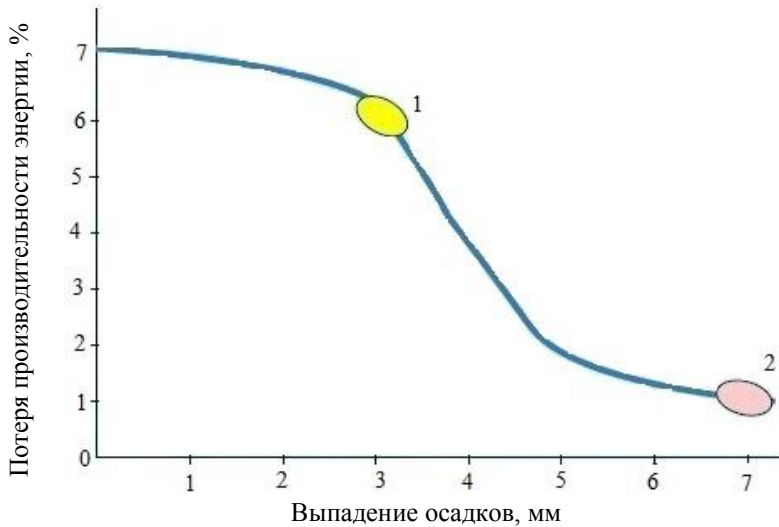
**Очищение поверхности ФЭП от загрязнений**

Очищение поверхности ФЭП происходит либо естественным путем (осадками), либо искусственным (с помощью человека).

*Естественное очищение*

При очищении поверхности ФЭП дождем можно выделить два определяющих эффективность очистки фактора: 1) количество осадков, выпадающих одновременно; 2) сезонный фактор выпадения дождей.

Значительная очистка ФЭП и, следовательно, уменьшение потерь производительности происходит только благодаря большому количеству осадков (рис. 4).



**Рис. 4** – Влияние атмосферных осадков на снижение потерь энергии ФЭП [6]:  
1 – начало интенсивного очищения;  
2 – без очищения

**Fig. 4** – Effect of precipitation on the decrease in energy losses of the PV [6]:  
1 – the beginning of intensive purification;  
2 – without purification

Опыт тестирования влияния осадков на производительность показывает:

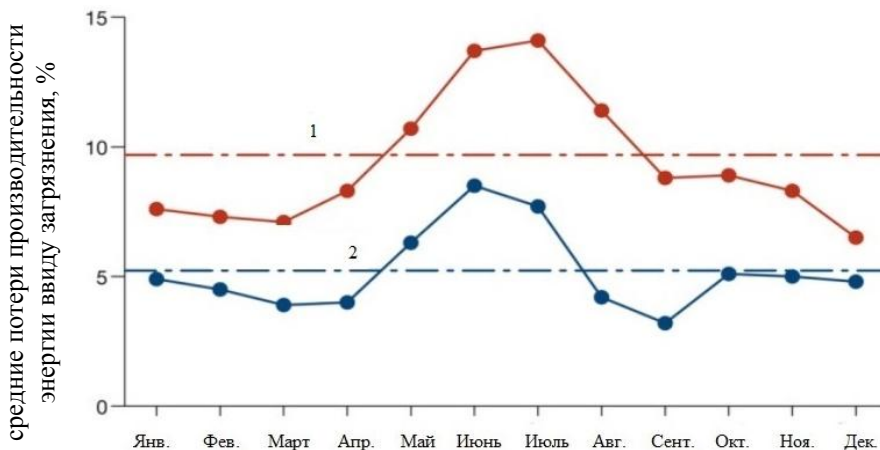
1. При загрязненности панели солнечных батарей с уровнем потерь производительности от 7 % до 7,5 % эффективное очищение происходит при выпадении более 4 ÷ 5 мм осадков (дождя);

1. Для снижения потерь производительности до 1 ÷ 1,5 % необходимо, чтобы уровень выпавших осадков (дождя) был не менее 7 ÷ 8 мм;

2. Любое количество осадков не приводит к 100%-му очищению (практически не очищаются, например, нижние углы панели) [6].

3. Сезонный фактор выпадения дождя.

Интенсивность загрязнения фотоэлектрических модулей наиболее велика, как правило, в летний засушливый период. В этом случае очищающий эффект дождя минимален. Поскольку уровень радиации летом является самым высоким, загрязнение панелей в этот период вызывает наибольшие потери в производительности ФЭП. Это можно проиллюстрировать измерениями, выполненными в различных климатических условиях, где показаны средние потери производительности для двух городов, расположенных в Аризоне (США) – Булхед Сити и Джила Бенд (рис. 5). Несмотря на то что количество осадков в обоих городах сопоставимо, и солнечная инсоляция, и потери производительности энергии выше в Булхенд Сити [6].



**Рис. 5** – Динамика потерь производительности ФЭП ввиду загрязнения в течение года [6]:  
1 – средние потери производительности энергии в Булхед Сити;  
2 – средние потери производительности энергии в Джила Бенд

**Fig. 5** – Dynamics of PV productivity losses due to pollution during the year [6]:  
1 – average losses of energy efficiency in Bulhead City;  
2 – average losses of energy efficiency in Gila Bend

Таким образом, количество и время выпадения осадков существенно влияют на выбор стратегии очистки фотоэлектрических панелей. Если в предыдущем году очистка солнечных модулей не проводилась, влияние дождя на очистку в текущем году становится менее значимым. Так, при наличии только естественного удаления загрязнений (дождь) солнечные модули очищаются лишь частично. Поэтому в

случаях, когда в какой-то год очистка фотоэлектрических панелей не проводится, в следующем году процесс загрязнения начинается уже с более высокого уровня. Слои грязи слипаются на поверхности панелей, их удаление становится всё более сложным и дорогим, следовательно, из года в год происходит очень большая потеря энергии. Механизм потери производительности показан на рис. 6.



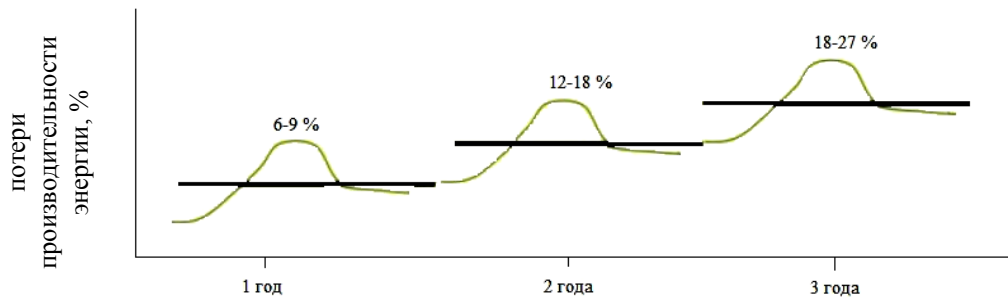


Рис. 6 – Увеличение потерь энергии ФЭП при отсутствии борьбы с загрязнением [6]  
 Fig. 6 – Increase in energy losses of the PV in the absence of pollution control [6]

На рис. 6 видно, как увеличиваются потери производительности энергии ФЭП при отсутствии борьбы с их загрязнением. Причем с каждым годом эти потери возрастают, и к концу третьего года ФЭП недодает потребителю уже порядка трети возможной выработки.

#### Искусственное очищение

Очистка солнечных модулей осуществляется с помощью различных средств. Наиболее часто применяется ручная (сухая и влажная) очистка, а также различные автоматизированные способы, такие как системы с насадками, щетками и т.д. [6, 19–21].

В области очистки ФЭП развивается метод так называемой наноочистки, в соответствии с которым поверхность солнечного модуля покрывают специальным гидрофобным составом. При этом, согласно [21–24], возникающий самоочищающийся эффект предотвращает прилипание пыли к ФЭП, и вся грязь легко удаляется после небольшого дождя или после ручного распыления воды на панели. Этот способ сохраняет панели чистыми, а также поддерживает их эффективность и обеспечивает получение максимального количества электроэнергии. Тем не менее в засушливом климате очистку панелей необходимо проводить регулярно путем принудительного распыления на них воды [21–24].

Кроме того, были разработаны методы электростатической очистки ФЭП, когда под действием наведенного электростатического поля пыль перемещается к краям панели. Несмотря на то что этот способ был протестирован на марсоходах, он еще не попал на рынок гелиоэнергетики [25].

Способы борьбы с оснежением предложены в [26–28].

#### Экспериментальное исследование влияния загрязнений в условиях г. Москвы

##### Описание экспериментальной установки

Следует напомнить, что производительность ФЭП уменьшается в первую очередь из-за углеродного загрязнения, далее – из-за почвенных частиц и частиц карбоната кальция. В Москве главным источником углеродного загрязнения являются автомобили, на долю которых в общем загрязнении воздуха приходится свыше 90 % [29]. В связи с этим особое внимание при проведении экспериментов уделялось загрязнению зольными частицами. Помимо этого, изучалось влияние снега на производительность ФЭП.

Исследования проводились на стенде, принципиальная схема которого представлена на рис. 7.

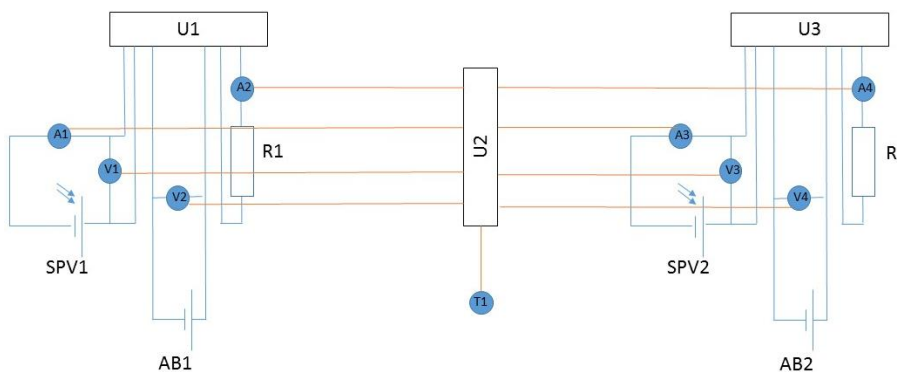


Рис. 7 – Принципиальная электрическая схема установки: синий цвет – силовые линии; красный – сигнальные: SPV1,2 – фотоэлектрические модули TPS107S\_60W; U1,3 – контроллеры заряда EPSolar Tracer 1210/1215RN MPPT 12/24В 10А; U2 – 12-канальный модуль аналогового ввода «АККОН»; AB1,2 – аккумуляторные батареи DTM1217; R1,2 – резисторы силовые АН-25, 25 Вт, 6,4 Ом, 5 % и АН-25, 25 Вт, 1 Ом, 5 %

Fig. 7 – Basic electrical diagram of the installation: blue – force lines; red – signal lines:

SPV1,2 – photovoltaic modules TPS107S\_60W; U1,3 – charge controllers EPSolar Tracer 1210 / 1215RN MPPT 12 / 24V 10A; U2 – 12-channel analog input module «ACCON»; AB1,2 – rechargeable batteries DTM1217; R1,2 – power resistors АН-25, 25 W, 6.4 Ohm, 5% and АН-25, 25 W, 1 Ohm, 5%



В установку входят два фотоэлектрических мини-модуля, располагающихся в одной плоскости. Для проекта были выбраны модули TPS107S\_60W (60 Вт, 12 В). Сравнивалась выработка энергии обоими модулями за одинаковые периоды времени. Для управления модулями отбор мощности осуществлялся МРРТ-контроллерами. Применение МРРТ-контроллеров обусловлено доступной частотой измерения на модулях аналогового ввода, регистрирующих силу тока и напряжение в цепях установки, так как частота изменения этих параметров для ШИМ-контроллеров требует применения осциллографа. С целью минимизации затрат были выбраны наименее мощные контроллеры EPSolar Tracer 1210/1215RN МРРТ 12/24В 10А. Для питания собственных нужд контроллера использовались аккумуляторные батареи. Для комплектации установки были выбраны аккумуляторы DTM1217. В роли нагрузки выступает балластное сопротивление, подключенное к нагрузочному входу резистора, обеспечивающее ток разряда аккумулятора в 0,1 С при напряжении 12 В и рассеивающее генерируемую тепловую мощность. Мини-модули размещаются на опорной конструкции, допускающей изменение угла наклона к горизонту. Несущей рамой для мини-модулей являются два алюминиевых профиля НОР, на которые быстросъемными винтовыми зажимами НОР-АЕС крепятся модули.

Система измерений обеспечивает регистрацию мощности и энергии, отбираемой от обоих мини-модулей. В связи с уличным размещением установки система измерений построена на 12-канальном модуле аналогового ввода компании АККОН. Регистрации подлежат сила тока и напряжение в цепи обоих модулей, напряжение на аккумуляторах (контрольный параметр), сила тока в цепи нагрузки (контрольный параметр), температура окружающей среды. Эксперименты проводились при угле наклона фотоэлектрических модулей, равном 55°. Для измерения уровня солнечной радиации использовался пиранометр QMS101 фирмы Kipp&Zonen, установленный в рабочей плоскости модуля.



**Рис. 8** – Экспериментальная установка при загрязнении (снег) обоих ФЭП

**Fig. 8** – Experimental installation with contamination (snow) of both PV

Серия экспериментов проводилась в осенне-зимний период, в основном в условиях низкой инсоляции. Один из ФЭП при каждом эксперименте был покрыт слоем пыли (зола, снега), второй (контрольный) – очищен. При этом температура воздуха составляла  $0 \div 2$  °С, а каждый эксперимент проводился в течение  $60 \div 90$  мин. Кроме того, перед основной серией экспериментов была проведена верификация и чистых модулей, и одновременно загрязненных (рис. 8).

Верификация показала: средняя погрешность измерения чистых модулей составляет 3 %, что согласуется с паспортными данными самих установок. При одновременном загрязнении отдельные зафиксированные значения разницы измерений достигали 8 %.

## Результаты и их обсуждение

### Влияние наличия загрязнения (зола) на выработку ФЭП

Запыление осуществлялось вручную, посредством рассыпания на поверхность ФЭП дорожной пыли. Поверхность модуля была предварительно протерта ветошью насухо. Данный эксперимент рассмотрен как «сухое запыление» (рис. 9).



**Рис. 9** – Солнечные модули в ходе эксперимента с «сухим запылением»: запыленный модуль справа; виден смонтированный на рамке модуля пиранометр для измерения солнечной радиации в плоскости солнечной батареи

**Fig. 9** – Solar modules during the experiment with dry dust: dusty module on the right; a pyranometer mounted on the frame of the module for measuring solar radiation in the plane of the solar battery is shown

Результаты измерений показывают, что запыление модуля не оказывает существенного влияния на выработку энергии. Более того, значительный угол наклона модуля и малая шероховатость фронтального покрытия ФЭП способствуют скатыванию частиц пыли с поверхности. По существу, пыль задерживается только рамкой модуля. С учетом зарубежного опыта эксплуатации фотоэлектрических станций в условиях пустыни на то, чтобы поверхность модуля сильно покрылась пылью, требуется около месяца



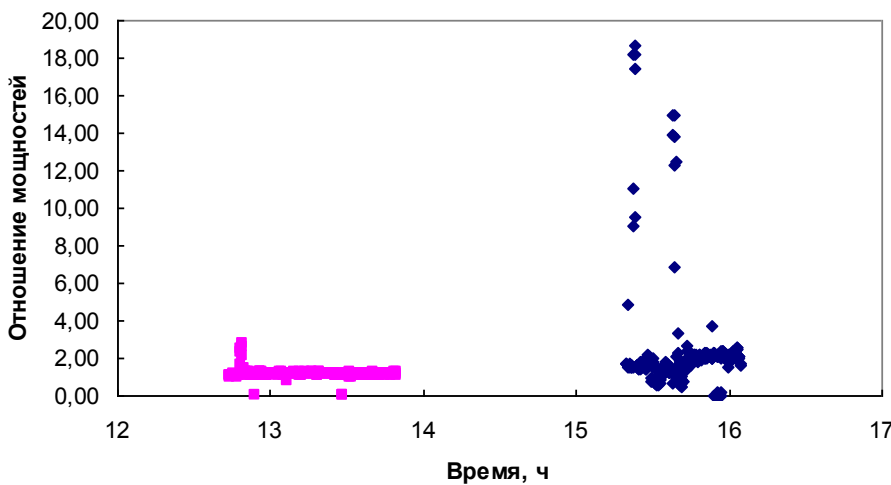
[30]. Такая ситуация была смоделирована посредством увеличения степени загрязнения модуля. В этом случае исходно увлажненная поверхность ФЭП-2 была покрыта зольными частицами, при этом увлажнение существенно улучшило адгезию зольных частиц к поверхности модуля («влажное запыление»).

Внешний вид модулей во время эксперимента представлен на рис. 10.

Даже в условиях пониженной инсоляции (в среднем  $35 \text{ Вт/м}^2$ ) разница между производительностью чистого и загрязненного модулей существенно возросла. Результаты расчета отношения мгновенных мощностей модулей в условиях «сухого» и «влажного» запыления представлены на рис. 11.



**Рис. 10** – Солнечные модули в ходе эксперимента с «влажным запылением»: запыленный модуль справа  
**Fig. 10** – Solar modules during the experiment with wet dusty module – on the right



**Рис. 11** – Соотношение мгновенных мощностей чистого и загрязненного фотоэлектрических модулей в условиях сухого и влажного запыления:  
♦ – влажное запыление;  
■ – сухое запыление  
**Fig. 11** – The ratio of instantaneous power of clean and contaminated photovoltaic modules under conditions of dry and wet dust:  
♦ – wet dust;  
■ – dry dust

Таким образом, при сухой поверхности фотоэлектрического модуля для достижения существенного для производительности солнечной батареи загрязнения требуется довольно много времени. При влажной поверхности солнечной батареи процесс осаждения загрязнения на поверхность идет достаточно быстро и способен привести к понижению выработки солнечной батареи в  $3 \div 10$  раз, что хорошо соотносится с полученными ранее результатами. Причем существует зависимость – при более высоких значениях инсоляции наблюдается более значительная разница в выработке чистого и запыленного ФЭП. Гладкая текстура фронтальной поверхности модуля и повышенные углы наклона способствуют самоочищению солнечной батареи под воздействием ветра и жидких осадков, в то время как рамка модуля затрудняет процесс очистки.

#### Влияние снега на выработку ФЭП

Серия экспериментов по оснежению была поставлена в условиях незначительной толщины снежного покрова. Один из ФЭП при каждом эксперименте был покрыт слоем снега, второй (контрольный) очищен (рис. 12).



**Рис. 12** – Экспериментальная установка при оснежении одного ФЭП  
**Fig. 12** – Experimental setup for snowfall of a single PV

Инсоляция во время проведения экспериментов варьировалась незначительно (рис. 13). Температура воздуха составляла  $0 \div 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Каждый эксперимент проводился в течение  $60 \div 90$  мин так, чтобы за единственный эксперимент снежный покров оставался однородным и значительные колебания инсоляции не происходили.



**Рис. 13** – Характерная зависимость инсоляции от времени при проведении экспериментальных исследований  
**Fig. 13** – The characteristic insolation dependence of time during experimental studies

Значения производительности (выработки энергии) модулей за время экспериментов приведены в таблице.

Интегральные показатели экспериментов

Таблица

Integral indicators of experiments

Table

Эксперимент	Время измерений, ч	Выработка модуля 1, Втч	Выработка модуля 2, Втч	Разница в выработке, %
Модуль 2 очищен	1,55	10,9	12,4	13,5

Таким образом, в условиях низкой инсоляции разница в выработке за счет очистки модуля за время эксперимента составила порядка 13 %. Полученные данные свидетельствуют о существенном снижении выработки модулей при низкой инсоляции (в среднем около 35 Вт/м<sup>2</sup>).

При этом оснежение приводит к значительному снижению расчетных значений мгновенного КПД модулей – главным образом ввиду отражения или поглощения значительной доли упавшего на поверхность солнечного излучения слоем снега, что приводит к существенной разнице в значениях интенсивности излучения, достигнутого активной поверхностью ФЭП и пиранометра. Кроме того, нельзя исключать влияния слоя снега на спектральный состав проходящего через него излучения.

Более подробные экспериментальные исследования по влиянию оснежения на выработку ФЭП, а также способы борьбы с ним планируется провести зимой 2018 г.

**Заключение**

При низких значениях инсоляции происходит резкий рост погрешности измерений производительности ФЭП, что связано, по-видимому, с исходным разбросом характеристик модулей и увеличением приборной погрешности на нижнем пределе шкалы приборов.

Главным источником снижения выработки электроэнергии на ФЭП (до 30 %) является влажное запыление углеродными частицами. В этом случае для эффективной эксплуатации солнечных энергоуста-

новок необходимо очищение поверхности ФЭП. При этом сухое запыление в Москве не играет существенной роли для выработки ФЭП, поскольку в данных климатических условиях для накопления пыли на установке требуется больше времени.

К значительному снижению расчетных значений мгновенного КПД модулей (свыше 10 %) приводит оснежение – в основном из-за того, что слой снега отражает или поглощает значительную долю упавшего на поверхность солнечного излучения. Это приводит к существенной разнице в значениях интенсивности излучения, которое достигает активной поверхности ФЭП и пиранометра. Слой снега может также влиять на спектральный состав проходящего через него излучения.

Для определения необходимой частоты очистки ФЭП и выбора максимально эффективного в условиях Москвы способа ее проведения требуется дальнейшее экспериментальное исследование.

**Благодарности**

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории № 2.1.3.2. ОИВТ РАН в.н.с. С.В. Киселевой и стажеру-исследователю С.В. Михайлину за существенный вклад в создание экспериментальной установки и помощь при проведении и организации исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы (грант 15-38-70036 мол\_а\_мос).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг. (ГР АААА-А-16-116051810073-5).



**Acknowledgements**

The authors are grateful to the staff of the Laboratory No. 2.1.3.2. OIVT RAS – Kiseleva S.V. and an intern-researcher. Mikhailina S.V. for a significant contribution to the creation of an experimental facility and assistance in conducting and organizing research.

The work was supported by the RFBR and the Moscow Government (grant 15-38-70036 mol\_a\_mos).

The work was carried out with partial financial support of the Program of Fundamental Scientific Research of the State Academies of Sciences for 2013-2020 (GR AAAA-A-16-116051810073-5).

**Список литературы**

[1] Коломиец, Ю.Г. Исследование влияния затенения на эффективность эксплуатации солнечных энергоустановок в условиях плотной городской застройки [Текст] / Ю.Г. Коломиец [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 19–21. – С. 16–25.

[2] Коломиец Ю.Г. Актинометрические данные для проектирования солнечных энергоустановок в Московском регионе. [Текст] / Коломиец Ю.Г. [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2016. – № 21–22. – С. 12–24.

[3] Radonjić, I. Influence of different types of dust on PV modules energy efficiency [Text] / I. Radonjić [et al.] // Proceedings of 1st Virtual International Conference on Science, Technology and Management in Energy eNergetics, Publisher: Research and Development Center “ALFATEC”, Nis, Serbia. – 2015. – 02–03 July. – P. 94–99.

[4] Mani, M. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations [Text] / M. Mani, R. Pillai // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – Vol. 14. – P. 3124–3131.

[5] Darwish, Z.A. Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance [Text] / Z.A. Darwish [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol. 41. – P. 735–744.

[6] Solar panels cleaning [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rollingwash.net/docs/Solar%20panels%20cleaning.pdf> – (дата обращения 05.08.2017).

[7] Recgroup [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.recgroup.com](http://www.recgroup.com) – (Дата обращения 06.07.2017).

[8] Sarver, T. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches [Text] / T. Sarver [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 22. – P. 698–733.

[9] Goossens, D. Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance [Text] /

D. Goossens, E. Van Kerschaever // Solar Energy. – 1999. – Vol. 66. – P. 277–289.

[10] Said, S.A.M. Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance [Text] / S.A.M. Said, H.M. Walwil // Solar Energy. – 2014. – Vol. 107. – P. 328–337.

[11] El-Shobokshy, M.S. Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells [Text] / M.S. El-Shobokshy, F.M. Hussein // Solar Energy. – 1993. – Vol. 51. – No 6. – P. 505–511.

[12] Ali, H.M. Effect of dust deposition on the performance of photovoltaic modules in Taxila, Pakistan [Text] / H.M. Ali [et al.] // Thermal Science. – online first, doi: 10.2298/TSCI140515046A.

[13] Bashir, M.A. An experimental investigation of performance of photovoltaic modules in Pakistan [Text] / M.A. Bashir [et al.] // Thermal Science. – 2015. – Vol. 19. – Suppl. 2. – P. S525–S534.

[14] Mekhilef, S. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells [Text] / S. Mekhilef [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – Vol. 16. – P. 2920–2925.

[15] Sayyah, A. Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels [Text] / A. Sayyah [et al.] // Solar Energy. – 2014. – Vol. 107. – P. 576–604.

[16] Велькин, В.И. Влияние снежного покрова на эффективность функционирования солнечных ФЭП / В.И. Велькин [Текст] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2012. – № 3. – С. 59–62.

[17] Wirth, G. Satellite-based snow identification and its impact on monitoring photovoltaic systems [Text] / G. Wirth [et al.] // Solar Energy. – 2010. – Vol. 84. – P. 215–226.

[18] Rob W. The effects of snowfall on solar photovoltaic performance [Text] / W. Rob [et al.] // Solar Energy. – 2013. – Vol. 92. – P. 84–97.

[19] Moharram, K.A. Influence of cleaning using water and surfactants on the performance of photovoltaic panels [Text] / K.A. Moharram [et al.] // Energy Conversion and Management. – 2013. – Vol. 68. – P. 266–272.

[20] Mavroidis, C. Robotic device for cleaning photovoltaic panel arrays. Department of Mechanical and Industrial Engineering / C. Mavroidis [et al.]. – Northeastern University, Green Project – Sustainable Technology and Energy Solutions, Patent Number 61/120097, 2009.

[21] Park, Y.-B. Self-cleaning effect of highly water-repellent microshell structures for solar cell applications [Text] / Y.-B. Park [et al.] // J. Mater. Chem. Korea Adv. Inst. Sci. Technol. – 2010. – Vol. 21. – P. 633–639.

[22] Nanopool [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.nanopool.eu/en/](http://www.nanopool.eu/en/) – (Дата обращения 08.08.2017).

[23] Nanoshell [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.nanoshell.co.uk/protective-coatings/solar-panel-pv](http://www.nanoshell.co.uk/protective-coatings/solar-panel-pv) – (Дата обращения 08.08.2017).





[24] Percenta- nanoproducts [Электронный ресурс]. – Режим доступа: percenta-nanoproducts.com/nano-coating-for-solar-panels.html – (Дата обращения 08.08.2017).

[25] Biris, A.S. Electrodynamics removal of contaminant particles and its applications [Text] / Biris A.S. [et al.]. – University of Arkansas at Little Rock, Applied Science Department, IEEE; 2004.

[26] Соломин, Е.В. Противообледенительная система солнечного модуля на основе инфракрасного излучателя [Текст] / Е.В. Соломин, В.В. Долгошеев, М.А. Ларцев // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2015. – № 2. – С.10–15.

[27] Долгошеев, В.В. Электротепловая система противообледенения солнечного модуля [Текст] / В.В. Долгошеев [et al.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 10–12. – С. 222–224.

[28] Самоочистка солнечных батарей от снега использующая эффект Вентури [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.teslatehnika.biz/samoochistka-batarei-venturi.html> – (Дата обращения 09.08.2017).

[29] Чем дышит Москва [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://moslenta.ru/city/eco-1.htm> – (Дата обращения 15.08.2017).

[30] Ruidong, Xu. Analysis of the optimum tilt angle for a soiled PV panel [Text] / Ruidong Xu [et al.] // Energy Conversion and Management. – 2017. – Vol. 148. – P. 100–109.

## References

[1] Kolomiets Yu.G., Kiseleva S.V., Rafikova Yu.Yu., Shakun V.P. Study of the effect of shading on the efficiency of solar power plants in dense urban areas (Issledovanie vliyaniya zateneniya na effektivnost' ekspluatatsii solnechnykh energoustanovok v usloviyakh plotnoi gorodskoi zastroiki). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2017;19–21:16–25 (in Russ.).

[2] Kolomiets Y.G., Gorbarenko E.V., Kiseleva S.V., Mordynskiy A.V., Frid S.E., Shilovtseva O.A. Solar radiation data for the design of solar power plants in the Moscow region (Aktinometricheskie dannye dlya proektirovaniya solnechnykh energoustanovok v Moskovskom regione). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2016;21–22:12–24 (in Russ.).

[3] Radonjić I., Pavlovic T., Mirjanic D., Radonjić M., Milosavlievic D., Pantic L. Influence of different types of dust on PV modules energy efficiency. *Proceedings of 1st Virtual International Conference on Science, Technology and Management in Energy eNergetics. Publisher: Research and Development Center "ALFATEC". Nis, Serbia, 2015;02–03 July:94–99 (in Eng.)*.

[4] Mani M., Pillai R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010;14:3124–3131 (in Eng.).

[5] Darwish Z.A., Hussein A.K., Sopian K., Al-Goul M.A., Alawadhi H. Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015;41:735–744 (in Eng.).

[6] Solar panels cleaning. Available on: <http://rollingwash.net/docs/Solar%20panels%20cleaning.pdf> (05.08.2017).

[7] Recgroup. Available on: [www.recgroup.com](http://www.recgroup.com) (06.07.2017).

[8] Sarver T., Al-Qaraghuli A., Kazmerski L.A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013;22:698–733 (in Eng.).

[9] Goossens D., Van Kerschaever E. Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance. *Solar Energy*, 1999;66:277–289 (in Eng.).

[10] Said S.A.M., Walwil H.M. Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance. *Solar Energy*, 2014;107:328–337 (in Eng.).

[11] El-Shobokshy M.S., Hussein F.M. Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. *Solar Energy*, 1993;6(51):505–511 (in Eng.).

[12] Ali H.M., Bashir M.A., Zafar M.A., Siddiqui A. Effect of dust deposition on the performance of photovoltaic modules in Taxila, Pakistan. *Thermal Science*, online first, doi: 10.2298/TSCI140515046A (in Eng.).

[13] Bashir, M.A., Ali H. M., Ali M., Siddiqui A. M. An experimental investigation of performance of photovoltaic modules in Pakistan. *Thermal Science*, 2015;19(2):525–534 (in Eng.).

[14] Mekhilef S., Saidur R., Kamalisarvestani M. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012;16:2920–2925 (in Eng.).

[15] Sayyah A., Horenstein M. N. and Mazumder M. K. Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. *Solar Energy*, 2014;107:576–604 (in Eng.).

[16] Vel'kin V.I. Effect of snow cover on the efficiency of solar photovoltaic panels (Vliyanie snezhnogo pokrova na effektivnost' funkcionirovaniya solnechnykh FEP). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2012;3:59–62 (in Russ.).

[17] Wirth G., Schroedter-Homscheidt M. Satellite-based snow identification and its impact on monitoring photovoltaic systems. *Solar Energy*, 2010;84:215–226 (in Eng.).

[18] Rob W., Pollard A., Pearce J. The effects of snowfall on solar photovoltaic performance. *Solar Energy*, 2013;92:84–97 (in Eng.).

[19] Moharram K.A., Abd S., Kandil H., El-Sherif H. Influence of cleaning using water and surfactants on the



performance of photovoltaic panels. *Energy Conversion and Management*, 2013;68:266–272 (in Eng.).

[20] Mavroidis C., Hastie J., Grandy A., Anderson M., Sweezy A., Markpolous Y. Robotic device for cleaning photovoltaic panel arrays. Department of Mechanical and Industrial Engineering, Northeastern University. Green Project – Sustainable Technology and Energy Solutions, Patent. Number 61/120097, 2009 (in Eng.).

[21] Park Y.-B., Im H., Im M., Choi Y.-K. Self-cleaning effect of highly water-repellent microshell structures for solar cell applications. *J. Mater. Chem. Korea Adv. Inst. Sci. Technol.*, 2010;21:633–639.

[22] Nanopool. Available on: [www.nanopool.eu/en/](http://www.nanopool.eu/en/) (08.08.2017).

[23] Nanoshell. Available on: [www.nanoshell.co.uk/protective-coatings/solar-panel-pv](http://www.nanoshell.co.uk/protective-coatings/solar-panel-pv) (08.09.2017).

[24] Percenta-nanoproducts. Available on: [www.percenta-nanoproducts.com/nano-coating-for-solar-panels.html](http://www.percenta-nanoproducts.com/nano-coating-for-solar-panels.html) (08.08.2017).

[25] Biris A.S., Saini D., Srirama P.K., Mazumder M.K., Sims R.A., Calle C.I., Buhler C.R. Electrodynamic removal of contaminant particles and its applications.

University of Arkansas at Little Rock. Applied Science Department. IEEE; 2004 (in Eng.).

[26] Solomin E.V. Anti-icing system of the solar module based on infrared emitter (Protivoobledenitel'naya sistema solnechnogo modulya na osnove infrakrasnogo izluchatelya). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2013;2(166):10–15 (in Russ.).

[27] Solomin E.V. Electrothermal de-icing system of solar module (Elektroteplovaya sistema protivooledeneniya solnechnogo modulya). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017;10–12:222–224 (in Russ.).

[28] Samoochistka-batarei-venturi. Available on: <http://www.tesla-tehnika.biz/samoochistka-batarei-venturi.html> (09.08.2017).

[29] What breathes Moscow (Chem dyshit Moskva). Available on: [http:// https://moslenta.ru/city/eco-1.htm](http://https://moslenta.ru/city/eco-1.htm) (15.08.2017).

[30] Ruidong Xu, Kai Ni, Yihua Hu, Jikai Si, Dongsheng Yu. Analysis of the optimum tilt angle for a soiled PV panel. *Energy Conversion and Management*, 2017;148:100–109 (in Eng.).

Транслитерация по BSI



### Межрегиональная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы особо охраняемых природных территорий»

12–13 апреля 2018 года будет проведена Межрегиональная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы особо охраняемых природных территорий».

Целью конференции является развитие системы особо охраняемых природных территорий и популяризации заповедной системы, актуализация вопросов изучения и охраны природных комплексов и развитие туризма на ООПТ.

На конференцию приглашаются представители органов власти, экологических служб, специалисты ООПТ, сотрудники НИИ, преподаватели, магистранты и студенты ВУЗов и другие заинтересованные лица.

Основные направления работы:

- историко-культурное наследие и традиционное природопользование на ООПТ: изучение, инвентаризация и сохранение;
- охрана биологического разнообразия, организация и проведение мониторинга;
- опыт ООПТ: территориальное планирование;
- меры по обеспечению экологической безопасности;
- взаимодействие с недропользователями;
- особенности социально-экономического партнерства;
- экологический туризм на ООПТ;
- проблемы организации и перспективы развития ООПТ; и др.

Для участия в конференции необходимо заполнить и прислать регистрационную форму до 10 апреля 2018. Статьи для публикации (объемом не более 5 страниц), оформленные в соответствии с требованиями, необходимо прислать не позднее 1 апреля 2018 по электронной почте: [Mproopt@mail.ru](mailto:Mproopt@mail.ru) с пометкой в теме письма «Материалы на Конференцию».

Заявки принимаются до 10 апреля 2018г.

Организаторы Конференции: Министерство природных ресурсов и экологии Республики Дагестан, ФГБУ «Государственный заповедник «Дагестанский», ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный педагогический университет», ДРОО «Дагестанский научно-краеведческий центр».

<http://dgpu.net/ru>

