

# Влияние частного солнечного затмения на интенсивность солнечного излучения\*

Андреева К.А., Васильева А.А., Васьков А.Г.

Национальный исследовательский университет “Московский Энергетический Институт”

г. Москва, Российская Федерация

[AndreevaXA@mpei.ru](mailto:AndreevaXA@mpei.ru), [VasilyevaAA@mpei.ru](mailto:VasilyevaAA@mpei.ru), [VaskovAG@mpei.ru](mailto:VaskovAG@mpei.ru)

**Аннотация.** Работа объединенной энергосистемы, в состав которой входят солнечные электростанции (СЭС), планируется с учетом изменений их мощности. Во многом указанные изменения носят случайный характер. Однако, такие природные явления как солнечное затмение могут быть спрогнозированы с высокой точностью. Это позволяет запланировать режим работы энергосистемы с учетом соответствующих изменений мощности СЭС, связанных с колебаниями солнечного излучения. В статье приведен анализ влияния частного солнечного затмения 25 октября 2022 года на интенсивность солнечного излучения, даны численные оценки величины и скорости изменения интенсивности солнечного излучения. Полученные данные позволят оптимизировать процесс планирования режима работы энергосистем с солнечными электростанциями.

**Ключевые слова:** солнечная электростанция, солнечное затмение, выработка энергии, прогноз, влияние.

## ВВЕДЕНИЕ

В будущем прогнозируется рост использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). [1] Однако использование возобновляемых источников в энергосистеме не может быть полностью стабильным, так как из-за погодных условий в тот или иной период времени выработка энергии может снизиться и частота сети нарушиться [2].

Солнечные затмения – явления хоть и не частые, но все же к ним необходима подготовка. Например, во время солнечного затмения 20 марта 2015 были проведены анализы и спрогнозированы сценарии данного явления, для электростанций были разработаны рекомендации [3-4].

Полутень от Луны может значительно повлиять на мощность, вырабатываемую СЭС. Во время затмения падает температура, снижается скорость ветра, и, самое важное, снижается интенсивность солнечного излучения. Соответственно, необходимо заранее прогнозировать выработку энергии хотя бы на день вперед, чтобы была возможность скомпенсировать недостаток электроэнергии за счет других источников энергии, в том числе и традиционных, несмотря на то, что перераспределение энергоресурсов во время солнечного затмения за счет других видов генерации приводит к увеличению стоимости электроэнергии, что было доказано в статье Flores et al. [5].

Теме моделирования солнечного затмения и его влияния на выработку солнечных модулей посвящены многие статьи. Предложена методология расчета трех составляющих солнечного излучения [6], учет температуры [7], спектра из-

лучения [8], влияния на частоту [9]. Влияние солнечного затмения можно предсказать с высокой точностью. Например, в Австралии предложен прогноз до 2040 года [10].

Как видно из рис. 1, солнечный потенциал России распределен крайне неравномерно: основная его часть сосредоточена на юге страны. При этом большая часть установок находится в удаленных местах, где отсутствует единая энергосистема (Рис. 2).

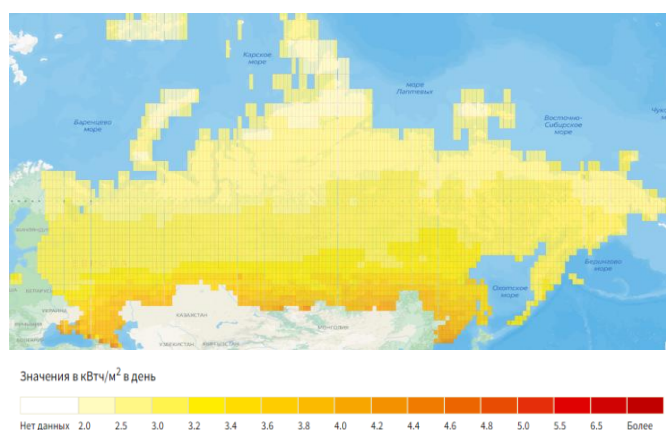


Рис. 1. Карта потенциала солнечного излучения России для горизонтальной площадки [11]

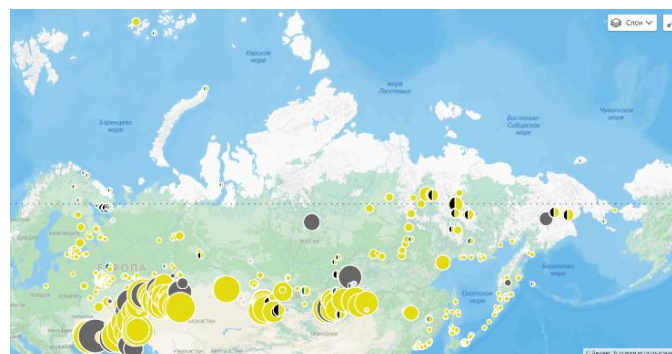


Рис. 2. Карта распределения солнечных электростанций на территории России [11]

На рис. 2 желтым обозначены работающие СЭС, серым – строящиеся СЭС, несколькими цветами – гибридные электростанции, использующие солнечную генерацию.

\* Исследование проводилось в рамках проекта “Системы управления солнечно-дизельными комплексами” при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSWF-2022-0006. Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции “Пром-Инжиниринг”, <https://icie-rus.org>

По данным АО “Системный оператор Единой энергетической системы” на 01.01.2023 года суммарная установленная мощность СЭС в России (учитывая только установки свыше 5 МВт) составляла 2 115,5 МВт [12].

В данную статистику входят станции, которые участвуют в оптовой продаже электроэнергии. Им необходимо заранее сообщать о планируемой выработке, чтобы потребитель не остался без электроэнергии в случае невозможности быстрой компенсации недовыработки другими источниками. Поэтому прогнозирование и разработка моделей очень важна для данной группы электростанций.

Установки менее 5 МВт либо используются в частной выработке энергии и в энергосистеме не участвуют, либо продают электроэнергию в розницу. Они сами отвечают за свою выработку, поэтому для них такой прогноз менее важен, но все же будет полезен.

#### ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе исследуется влияние солнечного затмения на приход солнечного излучения на горизонтальную площадку. Нужно смоделировать, как бы выглядел график прихода солнечного излучения, если бы не было затмения и проанализировать скорость изменения прихода солнечного излучения.

При анализе были использованы данные с метеостанции НИУ МЭИ. Так как в период солнечного затмения облачность была невысокая (максимальна в начале затмения – 30% и в районе 10% на протяжении затмения), то можно пренебречь диффузной и отраженной составляющей солнечного излучения и принять, что полученные значения являются прямой составляющей излучения. По этим данным, построена кривая прихода (прямой) солнечной радиации за день, на который выпало солнечное затмение. За период с 05:20:03 до 10:12:34 по техническим причинам данные с метеостанции не записывались, поэтому для полноты картины они были приблизительно восстановлены методом линейной интерполяции начиная с рассвета (7:21:25) и до возобновления записи (пунктирная кривая на рис. 3).

Для того, чтобы проанализировать, как повлияет солнечное затмение на приход солнечного излучения, а соответственно и на выработку электроэнергии, необходимо сравнить полученные значения с данными, которые были бы получены в близкий по погодным условиям день. Однако за день до солнечного затмения (24.10.22) и через день после (26.10.22) погодные условия достаточно сильно отличались. В предыдущем и более ранних годах данные для сравнения также не подходят в связи с большой облачностью.

Соответственно, для анализа были использованы теоретические кривые, моделирующие приход солнечной радиации в похожие с исследуемым днем условиями. Было выбрано два варианта построения теоретической кривой. Оба эти варианта графически представлены на рисунке 4.

Первый вариант базируется на определении аппроксимирующей кривой в виде полинома третьей степени для исходных данных. Построения велись с рассвета до начала затмения и с конца затмения до заката при помощи инструментов Excel.

Второй вариант основывался, согласно [9], на теоретическом расчете прямого солнечного излучения, падающего на горизонтальную площадку.

$$G_{bn} = G_0 \cdot e^{-0,1z \left(\frac{1}{\sin H_c}\right)^{0,8}} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}\right] \quad (1)$$

$$H_c = \arcsin(\sin L_{at} \cdot \sin \delta - \cos L_{at} \cdot \cos \delta \cdot \cos(15T))$$

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{284+N}{365}\right) [^\circ], \text{ по формуле Купера}$$

$G_0$  [Вт/м<sup>2</sup>] – солнечная постоянная,  $z$  [о.е.] – коэффициент мутности атмосферы Линке,  $H_c$  [°] – высота солнца,  $L_{at}$  [°] – градусы географической широты,  $T$  [ч] – время (0–24),  $\delta$  [°] – солнечное склонение,  $N$  [дни] – порядковый номер дня года.

Значение  $z$  принято равным 6, так как облачность не превышала 30% (для чистого неба данный коэффициент берется от 2 до 4),  $L_{at}=55,75569^\circ$ ,  $N=298$ ,  $G_0=1367$  Вт/м<sup>2</sup>.

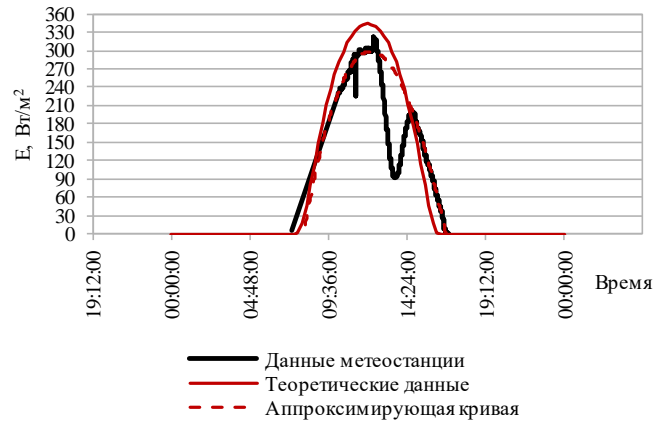


Рис. 4. График зависимости прихода солнечной радиации от времени суток с нанесенными теоретической и аппроксимирующей кривой

#### МЕТОДОЛОГИЯ

На территории НИУ «МЭИ» (55.7553 с.ш., 37.7092 в.д.) создана учебно-экспериментальная СЭС, включающая несколько массивов солнечных модулей, подключенных к разнотипным инверторам. СЭС НИУ «МЭИ» работает как в сетевом, так и в автономном режимах, обеспечивая энергией собственные помещения НИУ «МЭИ». Дополнительно учебно-экспериментальная СЭС НИУ «МЭИ» снабжена метеостанцией, фиксирующей основные метеорологические (температура окружающего воздуха, скорость и направление ветра, атмосферное давление и влажность, количество осадков) и актинометрические параметры. На метеостанции установлено два пиранометра: в горизонтальной плоскости и под углом 45 градусов к горизонту. В основе пиранометров - модель SMP 3 Kipp & Zonen отличается малым размером и весом. Основные технические характеристики измерительного оборудования:

- тип датчика – Термобатарея;
- классификация по ISO 9060:1990 - Второй класс;
- спектральный диапазон (50%) - от 300 до 2800 нм;
- чувствительность - от 5 до 20 мкВ/Вт/м<sup>2</sup>;
- зависимость чувствительности от температуры <5% (от -10°C до +40°C);
- период опроса – 15 сек.

На метеостанции организован автоматический круглосуточный мониторинг; данные сохраняются в базу данных и могут быть использованы для дальнейшей обработки. Для дальнейшего исследования использовался архив данных, полученных с горизонтально размещенного пиранометра.

25 октября 2022 года произошло повторение частного солнечного затмения 124 сароса 14 октября 2004 года, которое можно было наблюдать в 89 странах и зависимых территориях [13]. Оно началось на территории Исландии и завершилось в районе Аравийского моря. Максимальная фаза частного затмения 0,863 зарегистрирована в России в Ханты-Мансийском автономном округе – Югра.

На рис. 5 представлена схема протекания солнечного затмения. Зелеными линиями отмечены границы лунной полутени, звездочка соответствует точке наибольшего затмения. Затмение имеет только одну границу полутени.

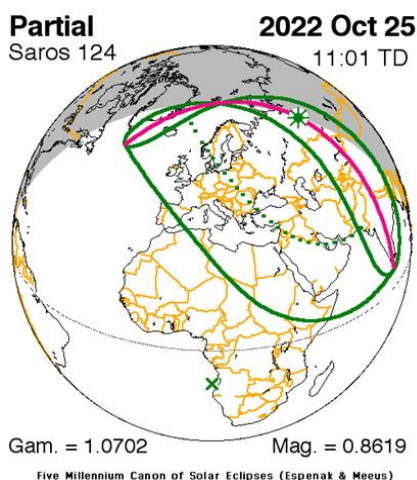


Рис. 5. Карта солнечного затмения 25.10.22 [15]

Метеостанция, на которой происходило наблюдение за солнечным затмением находится в Москве – ниже рассмотрено, что происходило за данный период на исследуемой территории.

Луна коснулась диска Солнца в 12 часов 24 минуты. Крайнее касание произошло в 14 часов 51 минуту. Максимальная фаза затмения наблюдалась в 13 часов 38 минут. Она достигла 70,9%. При таких условиях частная фаза покрытия Луной диска Солнца составила 63% от его площади [14]. Более наглядно перекрытие можно увидеть на рис. 6.

Погодные условия в наблюдаемый период были благоприятными. В этом можно убедиться, если просмотреть данные по погоде (табл. 1). Для анализа была рассмотрена наземная метеостанция в Москве (ВДНХ). Ясное небо и малая облачность способствовали наблюдениям. Поэтому можно в полной мере оценить влияние солнечного затмения на интенсивность солнечного излучения.

Таблица 1

Выдержка из данных по погоде за 25.10.22 [16]

Местное время в Москве (ВДНХ)	Общая облачность
00:00	Облаков нет
03:00	70-80%
06:00	20-30%
09:00	20-30%
12:00	20-30%
15:00	10% или менее, но не 0
18:00	Облаков нет
21:00	Облаков нет

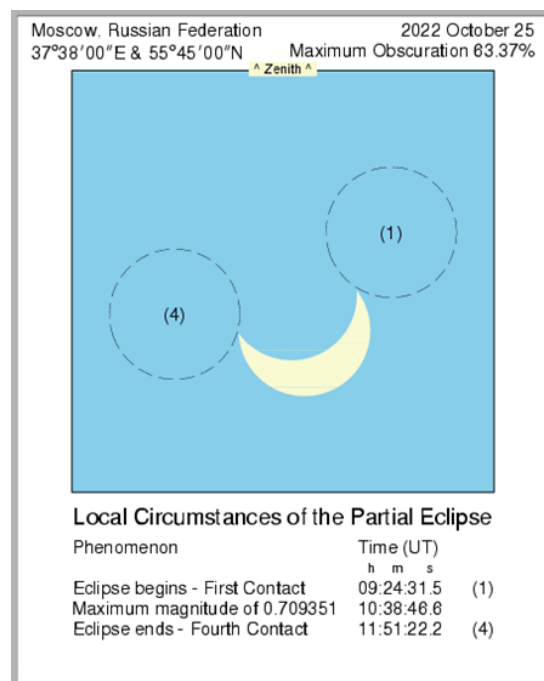


Рис. 6. Местные обстоятельства частного затмения

### РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 7 представлены кривые прихода солнечной радиации в период солнечного затмения. По данным метеостанции минимум интенсивности солнечного излучения наблюдался в 13:38 и составлял 91 Вт/м<sup>2</sup>. В то же время, если бы солнечного затмения не было, то приход солнечного света составил бы 288 Вт/м<sup>2</sup>. По аппроксимирующей зависимости значение составило 263 Вт/кв. м.

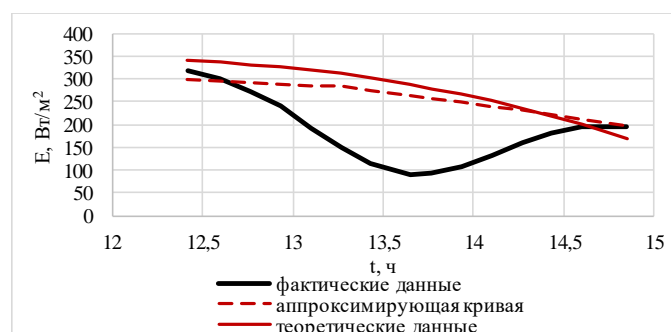


Рис. 7. График прихода солнечного излучения во время затмения

Был произведен расчет интенсивности солнечного излучения для различных фаз затмения, результаты приведены в табл. 2. При помощи инструментов Excel было выявлено, что достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,9927$ , достоверность теоретического расчета  $R^2 = 0,9861$ . Так как аппроксимирующая кривая наиболее точно описывает исследуемую зависимость, относительно нее и был произведен анализ собранных данных.

Проанализировав полученные значения, можно построить график зависимости изменения значения прихода прямого солнечного излучения относительно фазы затмения, рис. 8. Также построен график в относительных единицах, рис. 9.



Таблица 2

Анализ значений прихода солнечного излучения

Время (МСК)	Фаза, %	Данные метеостанции, Вт/м <sup>2</sup>	Теоретический расчет, Вт/м <sup>2</sup>	Аппроксимирующая кривая, Вт/м <sup>2</sup>
12:25	0	320	340	298
12:36	6	300	337	295
12:46	15	272	332	292
12:56	26	240	326	290
13:06	38	192	320	286
13:16	49	150	311	285
13:26	58	115	302	276
13:39	63	91	288	263
13:46	61	93	280	258
13:56	53	109	267	250
14:06	42	134	252	240
14:16	31	159	236	233
14:26	19	182	219	222
14:36	9	197	200	211
14:51	0	196	169	196

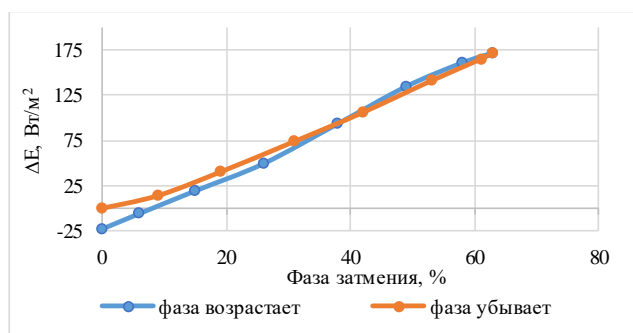


Рис. 8. Зависимость изменения E в день с чистым небом и во время затмения

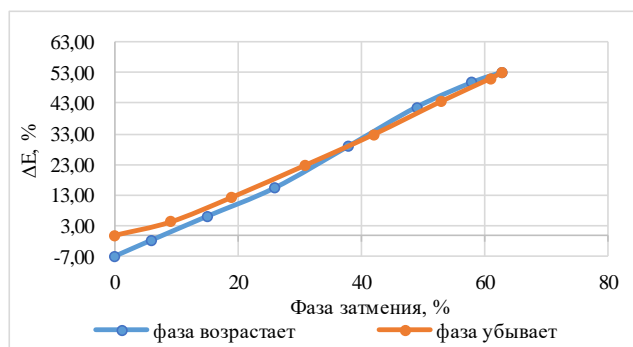


Рис. 9. Зависимость разности между E в день с чистым небом и во время затмения

Как видно из полученных графиков, чем больше фаза солнечного затмения, тем больше становится разница между теоретическим значением излучения, которое можно было бы получить при таких же погодных условиях без солнечного затмения, и фактическим значением, полученным при наблюдении и отслеживании данного явления.

Для оценки скорости реагирования других источников энергии на снижение мощности, подаваемой в сеть от СЭС, необходимо также знать с какой скоростью будет происходить это изменение. Именно с этой целью произведен анализ данных далее.

Данные за время прохождения солнечного затмения были разбиты по фазам и для каждой из них определена скорость снижения или увеличения прихода инсоляции на горизонтальную площадку (табл. 3.). Отрицательные значения соответствуют периоду начиная с первого касания Луной Солнца до пиковой фазы (12:24-13:38), а положительные значения соответствует периоду с пикового значения фазы до последнего касания Луной Солнца (13:38-14:51). По полученным значениям построены графики зависимости скорости изменения значения прихода солнечного излучения, рис. 10 и 11.

Таблица 3

Анализ значений прихода солнечного излучения

Время (МСК)	Фаза, %	Δt, мин	ΔE/Δt, Вт/м <sup>2</sup>
12:25	0	-	-
12:36	6	11	-1,82
12:46	15	10	-2,80
12:56	26	10	-3,20
13:06	38	10	-4,80
13:16	49	10	-4,20
13:26	58	10	-3,50
13:39	63	13	-1,85
13:46	61	7	0,29
13:56	53	10	1,60
14:06	42	10	2,50
14:16	31	10	2,50
14:26	19	10	2,30
14:36	9	10	1,50
14:51	0	15	-0,07

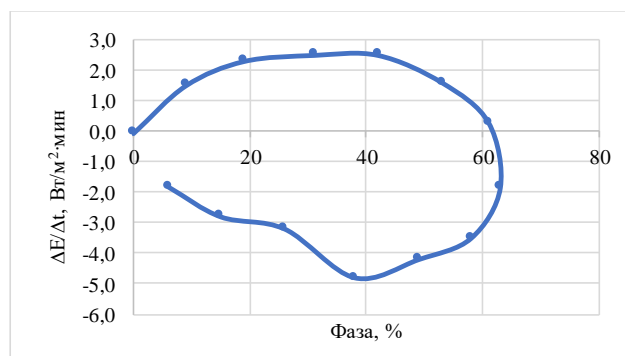


Рис. 10. Скорость изменения E по фазе затмения

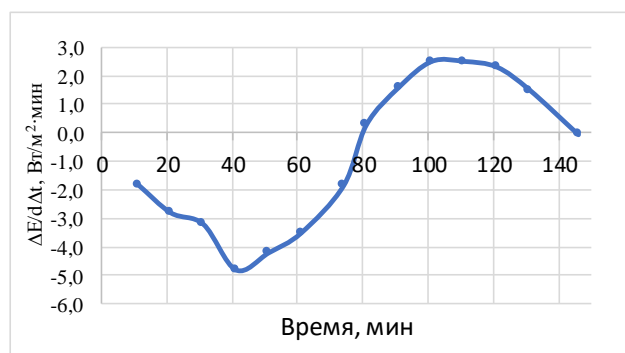


Рис. 11. Скорость изменения E по времени

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ актинометрических данных, полученных на метеостанции НИУ «МЭИ» во время частного солнечного затмения 25 октября 2022 года, позволил определить основные показатели изменчивости солнечного излучения. Максимальная скорость изменения солнечного излучения достигала примерно 50 Вт/м<sup>2</sup> за 10 минут, но в целом, не превышала 4 Вт/м<sup>2</sup> в минуту. Величина изменения интенсивности солнечного излучения прямо пропорциональна фазе солнечного затмения. Скорость изменения интенсивности солнечного излучения является важной величиной, которую нужно учитывать при компенсации недовыпуска электроэнергии от солнечных модулей. Для запуска резервных генераторов требуется время, также нужно учитывать время и скорость разрядки накопителей, что требует учета. Данные, полученные в этой статье, могут использоваться для дальнейшего анализа и прогнозов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> (дата обращения 31.01.2023).
2. Olowu T.O. Future challenges and mitigation methods for high photovoltaic penetration: a survey / T.O. Olowu, A. Sundararajan, M. Moghaddami, A.I. Sarwat // *Energies*. – 2018. – Vol. 11, is. 7. – P. 1-32.
3. Killinger S. Impact of the solar eclipse from 20<sup>th</sup> March 2015 on the German electrical supply – simulation and analysis / S. Killinger et al. // *Energy Technology*. – 2016. – Vol. 4. – P. 288-297.
4. Solar eclipse 2015. Impact analysis // European Network of Transmission System Operators for Electricity. – 19 February 2015.
5. Flores W.C. The solar eclipse of August 21, 2017 in Honduras: evidence of the impact on the power system

operation / W.C. Flores et al. // *IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition*. – Latin America (T&D-LA). – Lima, 2018. – P. 1-5.

6. Castillejo-Cuberos A. Analyzing Regional and Local Changes in Irradiance during the 2019 Total Solar Eclipse in Chile, Using Field Observations and Analytical Modeling / A. Castillejo-Cuberos, J.M. Cardemil, R. Escobar // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, is. 17. – P. 1-23.

7. Kurinec S.K. Monitoring a photovoltaic system during the partial solar eclipse of August 2017 / S.K. Kurinec, M. Kucer, B. Schein // *EPJ Photovoltaics*. – 2018. – Vol. 9, is. 7. – P. 1-10.

8. Madhavan B.L. Impact of a solar eclipse on surface radiation and photovoltaic energy / B.L. Madhavan, M. Venkat Ratnam // *Solar Energy*. – 2021. – Vol. 223. – P. 351-366.

9. Maslo K. Impact of photovoltaics on frequency stability of power system during solar eclipse / K. Maslo // *IEEE*. – 2016. – Vol. 31. – P. 3648-3655.

10. Millican A. Power system operation during solar eclipses: international lessons applied in Australia / A. Millican, D. Spoor // 7<sup>th</sup> IEEE Conference on Smart Grid. – Newcastle, December 9-11, 2019. – P. 58-63.

11. <http://gisre.ru> (дата обращения 31.01.2023).

12. <https://www.so-ups.ru> (дата обращения 31.01.2023).

13. <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEdecade/SEdecade2021.html> (дата обращения 31.01.2023).

14. <https://planetarium-moscow.ru/about/news/chastnoe-zatmenie-solntsa-25oktyabrya-202/> (дата обращения 31.01.2023).

15. [https://www.secl.ru/eclipse\\_catalog/2022\\_10\\_25.html](https://www.secl.ru/eclipse_catalog/2022_10_25.html) (дата обращения 31.01.2023).

16. <https://rp5.ru/> (дата обращения 31.01.2023).

DOI: 10.24892/RIJIE/20230304

# Impact of Partial Solar Eclipse on Solar Radiation Intensity

Andreeva K., Vasileva A., Vaskov A.

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"  
Moscow, Russian Federation

[AndreevaXA@mpei.ru](mailto:AndreevaXA@mpei.ru), [VasilyevaAA@mpei.ru](mailto:VasilyevaAA@mpei.ru), [VaskovAG@mpei.ru](mailto:VaskovAG@mpei.ru)

**Abstract.** United electrical power system operation is planned considering changes of power generation of solar power plants. These changes are predominantly random. However, such natural phenomena as solar eclipses could be predicted with high accuracy. It allows planning operation mode of power system taking into account the corresponding alterations of PV plant's power generation due to solar radiation fluctuations. The analysis of impact of the partial solar eclipse that occurred on 25<sup>th</sup> of October

2022 on solar radiation is provided in this paper, numerical estimations of value and rate of the solar radiation intensity change are given. The obtained data helps to optimize process of planning operation mode of power systems with PV plants.

**Keywords:** PV plant, solar eclipse, power generation, prediction, impact.

### Библиографическое описание статьи

Андреева К.А. Влияние частного солнечного затмения на интенсивность солнечного излучения / А.К. Андреева, А.А. Васильева, А.Г. Васьков // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2023. – Т.10, №3. – С. 20-24. DOI: 10.24892/RIJIE/20230304

### Reference to article

Andreeva K., Vasileva A., Vaskov A. Impact of partial solar eclipse on solar radiation intensity, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2023, vol.10, no.3, pp. 20-24. DOI: 10.24892/RIJIE/20230304