



# Энерговыработка многопереходных солнечных элементов с учетом широтной изменчивости спектрального состава излучения

Е. А. Ионова

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе  
Российской академии наук,  
Санкт-Петербург, Россия

Предложена оценка энерговыработки многопереходными солнечными элементами с учетом совокупного спектрального состава прямого солнечного излучения в годовом периоде. Показано, что коэффициент энерговыработки четырехпереходного солнечного элемента вблизи экватора составляет 45% в случае атмосферы с низким аэрозольным составом и 44% в случае атмосферы с аэрозольным наполнением, характерным для урбанизированных территорий. На широте +30° годовая энерговыработка данного солнечного элемента может составить 1001 кВт·час / м<sup>2</sup>. Для расчета энерговыработки установок и фотоэлектрических модулей с данными солнечными элементами требуется коррекция этой величины в связи с энергетическими потерями, обусловленными конструкцией энергоустановки.

**Ключевые слова:** многопереходный солнечный элемент, энерговыработка, КПД, атмосферная масса, солнечная электростанция

Статья получена: 19.09.2023

Статья принята: 11.10.2023

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наибольший КПД фотоэлектрического преобразования солнечного излу-

# Energy Yield of Multijunction Solar Cells With Allowance for the Latitude Variability of the Spectral Composition Radiation

E. A. Ionova

Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

An energy yield assessment of the multijunction solar cells is proposed with allowance for the total spectral composition of direct solar radiation during the annual period. It is shown that the energy yield ratio of a four-junction solar cell near the equator is 45% in the case of an atmosphere with a low aerosol composition and 44% in the case of an atmosphere with an aerosol filling typical for the urban areas. At a latitude of +30°, the annual energy yield of this solar cell can be 1001 kWh/m<sup>2</sup>. To calculate the energy yield of installations and photovoltaic modules with such solar cells, this value adjustment is required due to the energy losses caused by the power plant design.

**Keywords:** multijunction solar cell; energy yield; efficiency; air mass; solar power plant, photovoltaics

Article received: 19.09.2023

Article accepted: 11.10.2023

## INTRODUCTION

At present, the highest efficiency of solar radiation photoelectric conversion is provided by the solar cells (SCs) based on the A<sup>3</sup>B<sup>5</sup> semiconductor compounds with several active p-n junctions generated for individual parts of the solar spectrum [1]. The evaluation of prospective ground-based application of a solar energy system requires an assessment of its energy yield. The energy yield of multijunction solar cells under consideration is not fully determined by the integral photo-



чения обеспечивают солнечные элементы (СЭ) на основе полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  с несколькими активными  $p$ - $n$ -переходами, сформированными для отдельных участков солнечного спектра [1]. Оценка перспективы наземного использования солнечной энергосистемы требует оценки ее энерговыработки. Энерговыработка рассматриваемых многопереходных СЭ не в полной мере определяется интегральной фотометрической облученностью. Их фототок определяется наименьшим фототоком отдельных  $p$ - $n$ -переходов, поэтому играет роль еще и соотношение числа фотонов в участках спектра солнечного излучения, относящихся к разным  $p$ - $n$ -переходам. Но спектральный состав наземного солнечного излучения постоянно находится в состоянии изменения. В годовом периоде изменение спектра связано в первую очередь с осевым и орбитальным вращением Земли, приводящим к зависимости годового спектрального состава солнечного излучения от географической широты.

В текущей экономико-технологической точке развития «наземное» применение каскадных солнечных элементов оправдано только при преобразовании солнечного излучения, концентрированного с высокой кратностью. В этом случае СЭ расположен в оптическом фокусе концентратора, и апертура дорогостоящего СЭ заменяется апертурой дешевого концентратора. Оптическая система с фокусировкой излучения требует сборки в концентраторные фотоэлектрические модули, технологически несколько более сложные, чем солнечные панели на основе кремниевых СЭ, а также требует использования систем слежения за положением Солнца. При преобразовании концентрированного солнечного излучения КПД многопереходных СЭ остается наибольшим.

Целесообразность создания солнечных электростанций с многопереходными СЭ определяется по их энерговыработке. КПД СЭ и фотоэлектрических модулей на их основе определяется как отношение поглощенной и выработанной энергии, где поглощенная энергия имеет стандартизированное спектральное распределение, например IEC 60904-3. Это прямое солнечное излучение, падающее на площадку, перпендикулярную направлению его распространения, с параметром атмосферная масса (AM) – 1,5. В [2] показано, что для оценки эффективности функционирования многопереходных СЭ и для оптимизации работ по созданию СЭ с большим количеством  $p$ - $n$ -переходов важно рассматривать совокупный наземный спектральный состав солнечного излучения. Это можно отнести

metric irradiance. Their photocurrent is determined by the smallest photocurrent of individual  $p$ - $n$  junctions, so an important role is played by the photon ratio in sections of the solar radiation spectrum belonging to various  $p$ - $n$  junctions. However, the spectral composition of ground-level solar radiation is constantly in a state of flux. During the annual period, any spectrum change is associated, first of all, with the axial and orbital Earth's rotation, leading to the dependence of annual spectral composition of solar radiation on a geographic latitude.

At the current economic and technological point of development, the terrestrial use of multijunction solar cells is justified only when converting solar radiation concentrated with a high multiplicity. In this case, the solar cell is located at the concentrator's optical focus and the expensive solar cell aperture is replaced by the aperture of a cheap concentrator. An optical system with radiation focusing requires assembly into the concentrating photovoltaic modules that are technologically somewhat more complicated than the solar panels based on the silicon solar cells, and also requires application of the Sun tracking systems. When converting the concentrated solar radiation, the multijunction solar cell efficiency remains at the highest level.

The development feasibility of solar power plants with the multijunction solar cells is determined by their energy yield. The efficiency of solar cells and relevant photovoltaic modules is determined as the ratio of absorbed and generated energy, where the absorbed energy has a standardized spectral distribution (for example, IEC 60904-3). This is a direct solar radiation incident to an area perpendicular to its propagation direction, with an air mass (AM) parameter of 1.5. The paper [2] shows that, in order to assess the operating efficiency of multijunction solar cells and to optimize the solar cell development process with a larger number of  $p$ - $n$  junctions, it is important to consider the total ground-based spectral composition of solar radiation. This activity can also be attributed to the study of the existing multijunction solar cells.

The purpose of this work is to develop an energy yield assessment method for the highly efficient multijunction solar cells at various geographical latitudes during the annual period.

## 1. INFLUENCE OF THE SPECTRAL COMPOSITION OF DIRECT SOLAR RADIATION ON THE SOLAR CELL PHOTOCURRENT

The article discusses the up-to-date high-performance solar cells with 2, 3, 4, 5 and 6 active  $p$ - $n$  junctions and a high-performance silicon solar cell with an HJT



и к исследованию работы существующих многопереходных СЭ.

Задача данной работы – разработка метода оценки энерговыработки высокоэффективными многопереходными СЭ в различных географических широтах в годовом периоде.

## 1. ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ПРЯМОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФОТОТОК СЭ

В статье рассмотрены современные высокоэффективные СЭ с 2, 3, 4, 5, 6-ю активными *p-n*-переходами и высокоэффективный кремниевый СЭ с HJT-структурой, представленные в периодическом обзоре с рекордными значениями КПД для своего типа СЭ [1]. Сравнение указанных СЭ по размеру энерговыработки в годовом периоде возможно при условии обеспечения идентичного слежения за Солнцем. Исследование и многопереходных СЭ, и однопереходного СЭ проводилось при анализе фотопреобразования прямого солнечного излучения. Для расчета токов короткого замыкания использовались спектры внешнего квантового выхода, опубликованные в работах [1, 4–6] для СЭ с 2, 3, 4, 5, 6-ю *p-n*-переходами и СЭ с HJT-структурой соответственно. Для расчета энерговыработки использовались значения напряжений холостого хода ( $U_{oc}$ ) и факторов заполнения ВАХ (FF) при таких кратностях концентрирования, при которых установлены заявленные рекордные на настоящее время значения КПД (см. табл.).

В годовом периоде мощность и спектр прямого солнечного излучения (ПСИ) в первую очередь определяются совокупным путем сквозь атмосферу, который определяется совокупностью значений зенитного угла Солнца, специфичной для различных географических широт. Путь излучения в атмосфере определяется параметром атмосферной массы (AM), зависящим от зенитного угла, в данной работе рассчитываемым по формуле (Kasten, 1989) [8]. Рассматривалось изменение AM от 1 до 6 с шагом 0,01. Верхнее ограничение AM обусловлено тем, что при  $AM > 6$  Солнце расположено на высоте над горизонтом менее  $10^\circ$ , а это, как правило, сопряжено с затенением солнечной батареи наземными объектами.

Во вторую очередь ПСИ определяется аэрозольной наполненностью атмосферы, являющейся основным фактором рассеяния ПСИ в атмосфере. Аэрозольный состав атмосферы имеет как постоянный, так и изменяющийся характер, причем в годовом периоде первый превалирует. Были рассмотрены два типа состава атмосферы. Атмосфера с низкой

structure given in a periodic review with the record-breaking efficiency values for their SC type [1]. Comparison of the indicated solar cells by the energy yield during an annual period is possible provided for the identical Sun tracking. The study of both multijunction solar cells and single-junction solar cells has been performed with the photoconversion analysis of direct solar radiation. To calculate the short-circuit currents, we have used the external quantum efficiency spectra published in [1, 3–6] for SCs with 2, 3, 4, 5, 6 *p-n* junctions and SCs with HJT-structure, respectively. To calculate energy yield, we have used the values of open-circuit voltage ( $U_{oc}$ ) and fill factors of the current-voltage curve (FF) at the concentration ratios at which the declared current record-breaking efficiency values have been established (see table).

During an annual period, the power and spectrum of direct solar radiation (DSR) are primarily determined by the total path through the atmosphere that is based on the variety of the Sun zenith angle values specific for different geographical latitudes. The radiation path in the atmosphere is determined by the air mass (AM) parameter that depends on the zenith angle. In this work this angle is calculated by the formula (Kasten, 1989) [8]. A change in AM from 1 to 6 with a step of 0.01 has been considered. The upper AM limit is due to the fact that when  $AM > 6$  the Sun is located at a height above the horizon of less than  $10^\circ$ . As a rule, this fact is associated with the solar battery shading by the ground-based facilities.

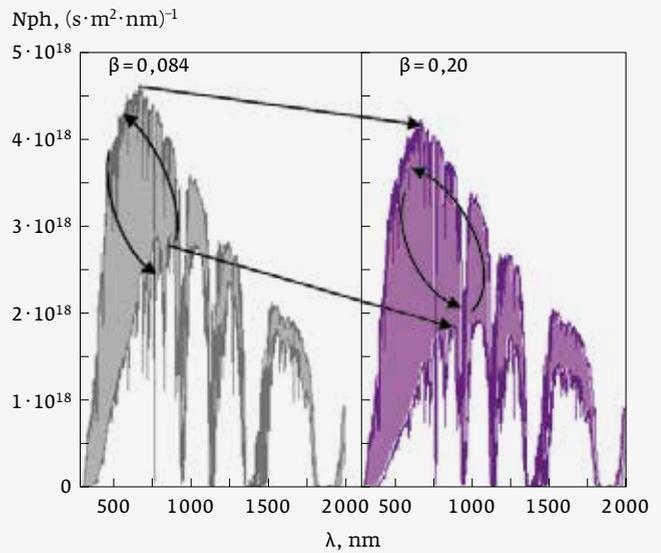
Secondly, the DSR is determined by the aerosol atmospheric content being the main factor in the DSR dispersion in the atmosphere. The aerosol atmospheric composition has both a constant and changing nature, and the first one prevails during the annual period. Two types of atmospheric composition have been considered, namely an atmosphere with the low aerosol turbidity complying with IEC60904-3 ( $\beta(500\text{ nm})=0.084$ ,  $\alpha_1/\alpha_2=0.94/1.42$ ) [9], and an atmosphere with aerosol turbidity typical for the urban areas, with the aerosol specifications of ( $\beta(500\text{ nm})=0.20$  [10],  $\alpha_1/\alpha_2=0.84/1.19$  [11]).

The DSR spectra have been determined by the SMARTS2.9.5 program with the adjustment of scattering and absorption calculation function ratios [9]. The spectra have been presented as the number of photons in a wavelength interval with the width of 1 nm crossing an area of  $1 \times 1\text{ m}^2$  in 1 second (Fig. 1). In the shaded area between the spectra with AM1 and AM6, the arrows show the changes in the photon flux spectral distribution that occur twice a day. The straight arrows indicate a decrease in the maximum point of the AM1 and AM6 spectra during the transition from

аэрозольной мутностью соответствующая стандарту IEC60904-3 ( $\beta(500\text{nm})=0,084$ ,  $\alpha_1/\alpha_2=0,94/1,42$ ) [9], и атмосфера с аэрозольной мутностью, характерной для урбанизированных территорий, с характеристиками аэрозоля ( $\beta(500\text{nm})=0,20$  [10],  $\alpha_1/\alpha_2=0,84/1,19$  [11]).

Спектры ПСИ определялись программой SMARTS2.9.5 с коррекцией коэффициентов функции расчета рассеяния и поглощения [9]. Спектры представлялись в форме числа фотонов в интервале длин волн шириной 1 нм, пересекающих за 1 с площадку  $1 \times 1 \text{ м}^2$  (рис. 1). На заштрихованной области между спектрами с AM1 и с AM6 стрелками показано происходящее два раза в сутки изменение спектрального распределения потока фотонов. Прямыми стрелками показано снижение максимальной точки спектров AM1 и AM6 при переходе от атмосферы первого типа ко второму. Таким образом продемонстрировано, что изменение пути излучения в атмосфере имеет преимущественное влияние на спектральный состав ПСИ в годовом периоде по сравнению с аэрозольной наполненностью.

Токи короткого замыкания ( $I_{sc}$ ) при облученности с параметром AM от 1 до 6 сначала рассчитывались отдельно для каждого  $p-n$ -перехода СЭ умножением спектральной характеристики  $p-n$ -перехода на спектры солнечного излучения, затем выделялся  $I_{sc}$  всего СЭ по минимальному значению  $I_{sc}$  всех активных  $p-n$ -переходов (рис. 2). В отличие от однопереходных СЭ, зависимости  $I_{sc}$  от AM многопереходных СЭ могут иметь точки перегиба в месте по шкале AM, где при изменении положения Солнца обеспечение минимального значения  $I_{sc}$  переходит от одного  $p-n$ -перехода к другому. Как показано на рис. 2, у СЭ с 3-мя или 5-ю  $p-n$ -переходами слева от точки перегиба  $I_{sc}$  определяется 2-м или 3-м  $p-n$ -переходами, а справа 1-м  $p-n$ -переходом. Числовые



**Рис. 1.** Спектральное распределение потока фотонов  $N_{ph}$  с AM от 1 до 6 (заштриховано) через атмосферы с низкой (слева) и высокой (справа) аэрозольной мутностью

**Fig. 1.** Spectral distribution of  $N_{ph}$  photon flux with AM from 1 to 6 (shaded) through the atmospheres with low (left) and high (right) aerosol turbidity

the first type of atmosphere to the second one. Thus, it has been demonstrated that any changes in the radiation path in the atmosphere have a predominant effect on the DSR spectral composition during the annual period compared to the aerosol filling.

The short circuit currents ( $I_{sc}$ ) under irradiation with an AM parameter from 1 to 6 have been first calculated separately for each SC  $p-n$  junction by multiplying the spectral specification of  $p-n$  junction by the solar radiation spectra, after which  $I_{sc}$  of the entire solar cell has been isolated based on the minimum  $I_{sc}$  value

**Таблица.** Рабочие параметры СЭ при рекордном КПД

**Table.** Operating parameters of SC with record-breaking efficiency

$p-n$ переходы $p-n$ junctions	Структура Structure	Концентрирование Concentration	$U_{oc}$ , В $U_{oc}$ , V	FF, % FF, %	КПД Efficiency
2	GaInAsP/GaInAs	38 <sup>*</sup>	2,23	85,7	35,5% [7]
3	GaInP/GaInAs/Ge	500 <sup>*</sup>	3,08	88,4	43,9% [4]
4	GaInP/GaInAs; GaInAsP/GaInAs	665 <sup>*</sup>	4,25	83,2	47,6% [1]
5	AllnGaP/InGaP/AllnGaAs/InGaAs/Ge	1000 <sup>*</sup>	5,55	85,0	42,6% [5]
6	AlGaInP/AlGaAs/GaAs/GaInAs(3)	143 <sup>*</sup>	6,29	87,2	47,1% [6]
1	$n$ -type HJT Si	1 <sup>*</sup>	0,75	86,1	26,8% [1]

значения зависимости  $I_{sc}(AM)$  вместе с совокупностью положений Солнца над горизонтом в данной географической точке определяют токовую составляющую энергвыхода системы.

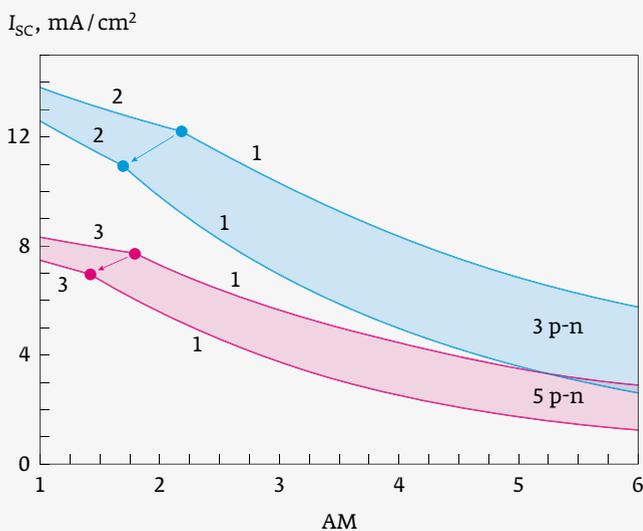
Переход к состоянию атмосферы с большим аэрозольным наполнением приводит к уменьшению  $I_{sc}$  и, что характерно только для многопереходных СЭ, к изменению формы  $I_{sc}(AM)$  за счет сдвига точки перегиба влево и возможной смены  $p-n$ -перехода, обеспечивающего минимальное значение  $I_{sc}$ . Влияние аэрозольной мутности в разбросе, характерном для разницы между урбанизированной местностью и отдаленных от нее территорий, отражено на примере СЭ с 3-мя и 5-ю  $p-n$ -переходами (рис. 2). СЭ с 5-ю  $p-n$ -переходами показывает меньшее снижение  $I_{sc}$  по сравнению с прозрачной атмосферой, в первую очередь благодаря меньшим абсолютным значениям  $I_{sc}$ .

## 2. СОВОКУПНОСТЬ ПОЛОЖЕНИЙ СОЛНЦА НАД ГОРИЗОНТОМ В ГОДОВОМ ПЕРИОДЕ

Поминутные положения Солнца были определены по параметру AM с помощью общедоступного вычислительного блока [12], составленного по материалам (Meeus, 1991) [13]. Выбор минуты, как шага для вычисления AM, обеспечивает достаточную точность отражения характера изменения AM во всех регионах планеты. На рис. 3 графически показано, что число минут в году со значениями AM в интервале шириной 0.01 значительно отличается в разных широтах и по сумме, и по форме статистического распределения  $N(AM)$ . Например, для  $\varphi=10, 40, 60^\circ$  среднегодовые значения AM в пределах 1-6 составляют 1.85, 2.21, 2.66, а общее число минут сияния с AM 1-6 составляет  $235 \cdot 10^3$ ,  $226 \cdot 10^3$ ,  $191 \cdot 10^3$  соответственно. Для расчета энергвыработки на известной широте совокупность положений Солнца в годовом периоде удобно представить как совокупность значений AM от 1 до 6 с шагом 0,01 и количества минут, в которые положение Солнца определяется данным AM (рис. 3).

## 3. ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГОВЫРАБОТКИ МНОГОПЕРЕХОДНЫХ СЭ ОТ ШИРОТЫ

Особенность суточного и годового вращения Земли дает постоянные в годовом периоде статистические распределения положений Солнца в разных широтах. Рассчитанное по этим статистическим распределениям годовое поступление энергии является постоянной величиной, равной условно предельной облученности для заданного широтного интервала, если атмосфера рассматривалась



**Рис. 2.** Токи короткого замыкания ( $I_{sc}$ ) СЭ с 3-мя и 5-ю  $p-n$ -переходами при облученности с параметром AM от 1 до 6 при атмосферах с низким и высоким аэрозольным наполнением (заштриховано)

**Fig. 2.** Short circuit currents ( $I_{sc}$ ) of solar cells with 3 and 5  $p-n$  junctions in the case of irradiation with the AM parameter from 1 to 6 in the atmospheres with low and high aerosol filling (shaded).

of all active  $p-n$  junctions (Fig. 2). In contrast to the single-junction solar cells, the dependences of  $I_{sc}$  on the AM of multijunction solar cells may have inflection points on the AM scale, where the minimum  $I_{sc}$  value is transferred from one  $p-n$  junction to another, when the Sun position is changed. As shown in Fig. 2, for the SCs with 3 or 5  $p-n$  junctions to the left of the inflection point,  $I_{sc}$  is determined by the 2<sup>nd</sup> or 3<sup>rd</sup>  $p-n$  junction, and to the right – by the 1<sup>st</sup>  $p-n$  junction. The numerical values of the  $I_{sc}(AM)$  dependence, together with the set of Sun positions above the horizon at a given geographic point, determine the current component of the system's energy output.

The transition to an atmospheric condition with a large aerosol filling leads to a decrease in  $I_{sc}$  and, that is typical only for multijunction solar cells, to a change in the  $I_{sc}(AM)$  shape due to the shift of inflection point to the left and a possible change in the  $p-n$  junction providing the minimum  $I_{sc}$  value. The influence of aerosol turbidity in the spread typical for the difference between an urban area and remoted regions, is shown by the solar cells with 3 and 5  $p-n$  junctions (Fig. 2). The solar cell with 5  $p-n$  junctions demonstrates a smaller decrease in  $I_{sc}$  compared to the transparent atmosphere, primarily due to the lower absolute  $I_{sc}$  values.



в составе, обеспечивающим низкий уровень рассеяния и поглощения. Первый из рассматриваемых типов атмосферы удовлетворяет этому условию, т.к. еще меньший аэрозольный состав атмосфера имеет в небольшом количестве географических локаций.

Предельная годовая энерговыработка СЭ в известном широтном интервале рассчитывалась по соответствующему статистическому распределению  $N(AM)$  и  $I_{sc}(AM)$  для атмосферы первого типа (рис. 2). Использовались значения  $U_{oc}$  и  $FF$  ВАХ, представленные в табл.

Коэффициент энерговыработки СЭ –  $K_w$  рассчитывался по аналогии с КПД, как отношение предельной годовой энерговыработки и предельной годовой облученности. Изогнутость широтной зависимости  $K_w$  и сниженное значение  $K_w$  по сравнению с КПД СЭ (показан пунктиром) отражает влияние спектрального состава ПСИ в годовом периоде на энерговыработку многопереходными СЭ (рис. 4). Форма широтной зависимости  $K_w$  обусловлена структурой СЭ в части схемы разделения им солнечного спектра на области поглощения отдельными  $p$ - $n$ -переходами. У рассмотренных СЭ  $K_w$  вдоль широтного диапазона изменяется в пределах 3 процентных пунктов.

Форма широтных зависимостей предельных годовых энерговыработок СЭ фактически повторяет форму широтной зависимости годового поступления энергии с точностью до  $K_w(\varphi)$  (рис. 5). Набольшие значения предельной годовой энерговыработки в низких широтах связаны с большим вкладом в годовой спектральный состав мощного солнечного излучения с  $AM$  от 1 до 1.5. Минимумы на широтах примерно  $70^\circ$  связаны с возросшим вкладом неучитываемого ПСИ с  $AM$  более 6, а последующее возрастание предельных годовых энерговыработок связано с увеличением временных периодов, когда Солнце не заходит за горизонт.

#### 4. КОЭФФИЦИЕНТ ЭНЕРГОВЫРАБОТКИ СЭ В АТМОСФЕРЕ ВТОРОГО ТИПА

Для случая атмосферы второго типа, характерной для урбанизированной территории, также проведен расчет коэффициента энерговыработки  $K_w$  СЭ. Коэффициент  $K_w$  рассчитан для  $\varphi$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  с. ш., но в высоких широтах результаты для атмосфер двух типов имеют умозрительный характер из-за особенно прозрачной атмосферы в действительности. На рис. 6 в виде заштрихованной области показано, что при переходе от состава атмосферы первого типа ко второму происходит снижение  $K_w$ , возрастающее при удалении от экватора. В широ-

## 2. POSITIONS OF THE SUN ABOVE THE HORIZON DURING THE ANNUAL PERIOD

The minute-based Sun positions have been determined on the basis of the  $AM$  parameter using a publicly available computing unit [12] consisting of the materials (Meeus, 1991) [13]. The selection of a minute as an  $AM$  calculation step provides sufficient accuracy in reflecting the nature of  $AM$  changes in all regions of the planet. Figure 3 graphically shows that the number of minutes per year with the  $AM$  values in an interval with the width of 0.01 differs significantly at various latitudes both in the amount and in the shape of statistical distribution  $N(AM)$ . For example, for  $\varphi = 10, 40, 60^\circ$ , the average annual  $AM$  values in the range of 1-6 are 1.85, 2.21, 2.66, and the total number of radiance minutes with  $AM$  1-6 is  $235 \cdot 10^3$ ,  $226 \cdot 10^3$ ,  $191 \cdot 10^3$ , respectively. To calculate energy yield at a known latitude, it is convenient to represent the set of Sun positions during an annual period as a set of  $AM$  values from 1 to 6 with a step of 0.01 and the number of minutes in which the Sun position is determined by this  $AM$  (Fig. 3).

## 3. ENERGY YIELD DEPENDENCE OF THE MULTI JUNCTION SOLAR CELLS ON LATITUDE

The feature of the daily and annual Earth's rotation leads to the statistical distributions of the Sun positions at various latitudes that are constant over the annual period. The annual energy input calculated on the basis of these statistical distributions is a constant value equal to the conditionally maximum irradiance for a given latitude interval, if the atmosphere considered has a composition that ensures a low scattering and absorption level. The first considered atmospheric type complies with this condition, since the atmosphere has an even lower aerosol composition in a small number of geographical locations.

The maximum annual energy yield of SCs in a known latitude interval has been calculated according to the relevant statistical distribution of  $N(AM)$  and  $I_{sc}(AM)$  for the first type of atmosphere (Fig. 2). The values of  $U_{oc}$  and  $FF$  of the current-voltage curve given in the table have been used.

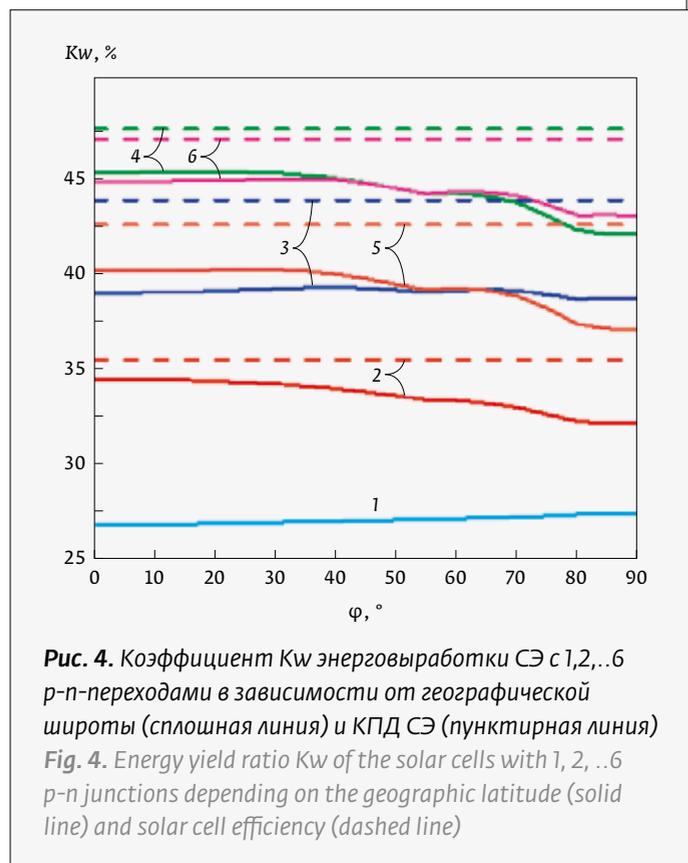
The energy yield ratio ( $K_w$ ) of SCs was calculated similar to the efficiency as the ratio of the maximum annual energy yield and the maximum annual irradiance. The curvature of the latitude dependence  $K_w$  and the reduced  $K_w$  value compared to the solar cell efficiency (shown by the dotted line) indicates the influence of the DSR spectral composition during the annual period on the energy yield of multijunction solar cells (Fig. 4). The type of the  $K_w$  latitude dependence is determined by the SC structure in terms of its

тах вокруг экватора  $K_w$  многопереходных СЭ меньше примерно на 1,5% пункта, а на широте  $30^\circ$   $K_w$  СЭ с 1, 2, ..., 6-ю  $p$ - $n$ -переходами снижается на 0,5; 1,9; 1,3; 2,0; 2,0; 2,5% пункта соответственно.

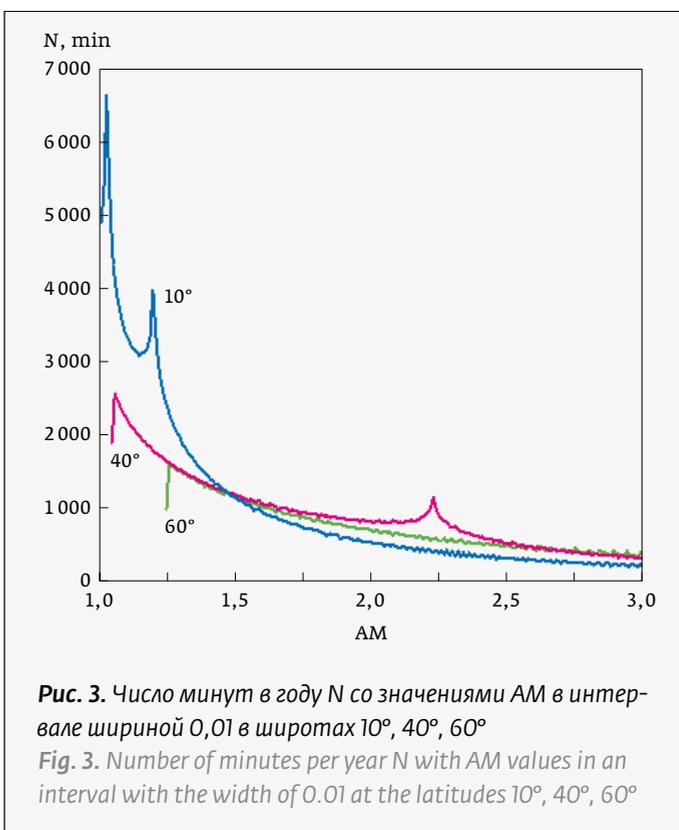
Базовая причина снижения  $K_w$  в том, что уменьшение поступающей энергии с ростом аэрозольной мутности преимущественно приходится на участок спектра ПСИ, относящийся к области поглощения  $p$ - $n$ -перехода, ограничивающего фототок СЭ. А т.к. расчет поступающего излучения ведется в широком диапазоне 280-4000 нм, значительно превышающий участок поглощения данным  $p$ - $n$ -переходом, то облученность уменьшается меньше, чем энерговыработка. В случае многопереходных СЭ дополнительная причина снижения  $K_w$  – сдвиг точки смены  $p$ - $n$ -перехода, ограничивающего ток СЭ, влево по шкале АМ, приводящий к уменьшению тока СЭ (рис. 2).

## 5. ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ РЕАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИИ

Реальная электрогенерация в годовом периоде ниже предельной, описанной в п. 3, из-за того, что либо усиливаются поглощающие и рассеивающие свойства атмосферы, либо прямое излучение отсутствует полностью из-за затенения облаками. Для



**Рис. 4.** Коэффициент  $K_w$  энерговыработки СЭ с 1, 2, ..., 6  $p$ - $n$ -переходами в зависимости от географической широты (сплошная линия) и КПД СЭ (пунктирная линия)  
**Fig. 4.** Energy yield ratio  $K_w$  of the solar cells with 1, 2, ..., 6  $p$ - $n$  junctions depending on the geographic latitude (solid line) and solar cell efficiency (dashed line)



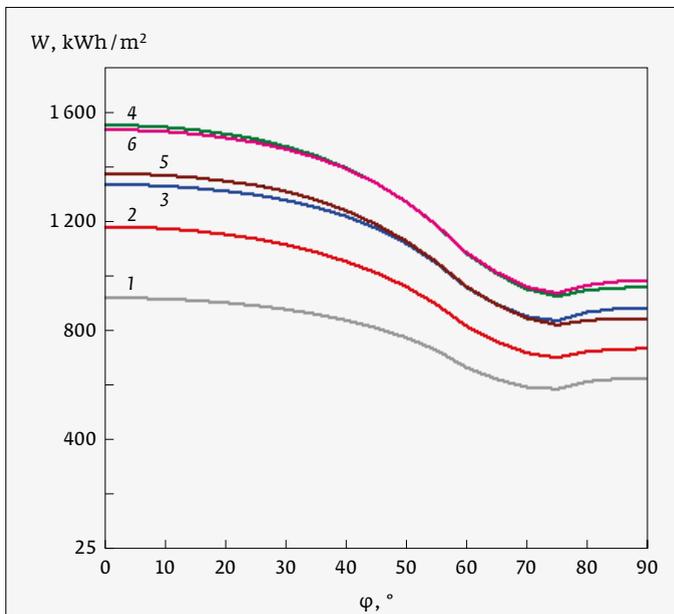
**Рис. 3.** Число минут в году  $N$  со значениями АМ в интервале шириной 0,01 в широтах  $10^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$   
**Fig. 3.** Number of minutes per year  $N$  with AM values in an interval with the width of 0.01 at the latitudes  $10^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$

solar spectrum division into the absorption areas by individual  $p$ - $n$  junctions. For the considered SCs, the  $K_w$  value varies within the latitudinal range within 3 percentage points.

The shape of the latitudinal dependences of the maximum annual SC energy yield actually follows the shape of the latitudinal dependence of the annual energy input with an accuracy of  $K_w(\varphi)$  (Fig. 5). The highest values of the maximum annual energy yield at low latitudes are associated with a large contribution to the annual spectral composition of powerful solar radiation with AM from 1 to 1.5. The minima at the latitudes of approximately  $70^\circ$  are related to an increased contribution of unaccounted DSR with an AM greater than 6, and a subsequent increase in the maximum annual energy yield is associated with an increase in the time periods when the Sun does not set below the horizon.

## 4. ENERGY YIELD RATIO OF SOLAR CELLS IN THE SECOND TYPE ATMOSPHERE.

In the case of the second type atmosphere typical for the urban area, the energy yield ratio  $K_w$  of the solar cells has also been calculated. The  $K_w$  ratio is calculated for  $\varphi$  from  $0^\circ$  to  $90^\circ$  N, but at the high latitudes the results for the two types of atmospheres are speculative due to the actually particularly transparent atmo-



**Рис. 5.** Предельная годовая энергосовыработка  $W$ , кВт·час/ $m^2$  СЭ с 1,2,..6  $p$ - $n$ -переходами в зависимости от географической широты при атмосфере стандарта IEC 60904-3

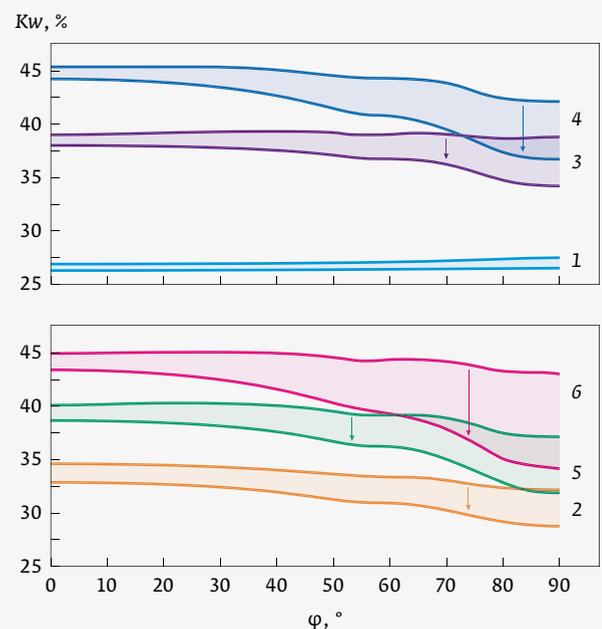
**Fig. 5.** Maximum permissible annual energy yield  $W$ , kWh/ $m^2$  of the solar cells with 1, 2, ..6  $p$ - $n$  junctions depending on the geographic latitude in an atmosphere determined in IEC 60904-3

оценки реальной электрогенерации в выбранном регионе необходимо учесть фактическое годовое поступление энергии. При этом можно воспользоваться имеющимися данными о годовом поступлении энергии ПСИ [14] и использовать рассчитанные коэффициенты энергосовыработки. В регионах с высокой сезонностью атмосферы (например, сезоны дождей) возможно потребуется уточнение, для которого необходимо повторить описанную в статье процедуру расчета с разбивкой по сезонам. Величину коэффициента энергосовыработки можно выбирать исходя из аэрозольной наполненности атмосферы в регионе. Необходимо также учесть, что происходит снижение энергосовыработки в зависимости от типа энергоустановки, из-за оптических потерь при концентрировании ПСИ и электротехнических потерь на коммутацию СЭ.

Например, на широте  $30^\circ$ , в случае атмосферы второго типа в течении всего года, СЭ с 4-мя  $p$ - $n$ -переходами имеет  $Kw_\varphi = 42,59\%$  (рис. 6), а годовая облученность по материалам [14] составляет  $2350$  кВт·час/ $m^2$ . Тогда годовую энергосовыработку данного СЭ можно оценить как  $1001$  кВт·час/ $m^2$  с точностью до отличия реального

сферы. Figure 6 shows in the form of a shaded area that when transferring from the first type atmospheric composition to the second one, there is a decrease in  $Kw$  that increases with the distance from the equator. At the latitudes around the equator,  $Kw$  of multijunction solar cells is less by about 1.5 percentage points, and at a latitude of  $30^\circ$ ,  $Kw$  of solar cells with 1, 2, ...6  $p$ - $n$  junctions is reduced by 0.5, 1.9, 1.3, 2.0, 2.0, 2.5 percentage points, respectively.

The basic reason for the decrease in  $Kw$  is that the decrease in incoming energy upon increasing the aerosol turbidity predominantly occurs in the DSR spectral region related to the absorption region of the  $p$ - $n$  junction that limits the solar cell photocurrent. However, since the incoming radiation is calculated in a wide range of 280–4000 nm significantly exceeding the absorption region of this  $p$ - $n$  junction, the irradiance is decreased less than the energy yield. In the case of multijunction SCs, an additional reason for the decrease



**Рис. 6.** Снижение коэффициента энергосовыработки  $Kw$  СЭ с 1,3,4  $p$ - $n$ -переходами (вверху) с 2,5,6  $p$ - $n$ -переходами (внизу) при переходе от низкой к высокой аэрозольной наполненности атмосферы (заштриховано). Примечание: в действительности, в высоких широтах благодаря прозрачной атмосфере  $Kw$  не снижается

**Fig. 6.** Decrease in the energy yield ratio  $Kw$  of SCs with 1, 3, 4  $p$ - $n$  junctions (top), with 2, 5, 6  $p$ - $n$  junctions (bottom) during the transition from the low to high atmosphere aerosol filling (shaded). Note: in practice, the  $Kw$  value is not decreased at the high latitudes due to the transparent atmosphere



состава атмосферы от атмосферы второго типа. Энерговыворотка фотоэлектрического модуля и всей энергоустановки с данным СЭ будет снижена на величину порядка 10–20%, определяемую параметрами конструкции конкретной системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика оценки годовой энергосборки многопереходными фотопреобразователями на примере СЭ с 1–6  $p$ - $n$ -переходами с рекордными КПД. Показано, что годовую генерацию можно оценивать с помощью коэффициента энергосборки, который оказывается ниже значения, определенного для спектра AM1.5. Коэффициент энергосборки изменяется в зависимости от аэрозольной наполненности атмосферы.

## REFERENCES

1. Green M. A., Dunlop E. D., Siefert G., et al. Solar cell efficiency tables (Version 61). *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2023; 31: 3–16. DOI:10.1002/ppv.3646.
2. Vossier A., Riverola A., Chemisana D., Dollet A., Gueymard C. A. Is conversion efficiency still relevant to qualify advanced multi-junction solar cells? *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2017; 25: 242–254. DOI:10.1002/ppv.2853.
3. Green M. A., Hishikawa Y., Dunlop E. D., Levi D. H., Hohl-Ebinger J., Ho-Baillie A. W. Solar cell efficiency tables (version 51). *Prog Photovolt Res Appl.* 2018;26:3–12. DOI:10.1002/ppv.2978.
4. PV Solar Cells [Accessed on 08.12. 2021] <https://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-cpv/cpv-solar-cells>.
5. Schroth P., Löckenhoff R., Fuhrmann D., et al. AZUR's new 5C46 CPV cell: Final design for optimized outdoor performance. *AIP Conference Proceedings.* 2022; 2550:020008. <https://doi.org/10.1063/5.0100397>.
6. Geisz J. F., France R. M., Schulte K. L., Steiner M. A., Norman A. G., Guthrey H. L., Young M. R., Song T., Moriarty T. Six-junction III–V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration. *Nature Energy.* 2020; 5:326–335. DOI:10.1038/s41560-020-0598-5.
7. N. Jain, K. L. Schulte, J. F. Geisz, D. J. Friedman, R. M. France, E. E. Perl, A. G. Norman, H. L. Guthrey, M. A. Steiner High-efficiency inverted metamorphic 1.7/1.1 eV GaInAsP/GaInAs dual-junction solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 2018; 112: 053905. DOI:10.1063/1.5008517.
8. Kasten F., Young A. T. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Opt.* 1989; 28: 4735–4738.
9. Gueymard C. A. The SMARTS spectral irradiance model after 25 years: New developments and validation of reference spectra. *Solar Energy.* 2019;187:233–253. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.048>Get rights and content.
10. Rusina E. N., Radionov V. F., Sibir E. E. Rezul'taty monitoringa aerazol'noj sostavlyayushchej atmosfery v srednih i vysokih shiroтах i nad akvatoriej Mirovogo okeana. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* 2016; 2(108): 5–15. (In Russ.)  
Русина Е. Н., Радионов В. Ф., Сибир Е. Е. Результаты мониторинга аэрозольной составляющей атмосферы в средних и высоких широтах и над акваторией Мирового океана. *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2016; 2(108): 5–15.)
11. Gueymard C. A. *Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine, version 2 (SMARTS2): Algorithms description and performance assessment* / Florida Solar Energy Center: Report FSEC-PF-270–95. 1995.
12. Solar Geometry Calculator. [Accessed on 13.02.2023]. URL: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/neubrew/SolarCalc.jsp>.
13. Meus J. *Astronomical algorithms.* Willmann-Bell, Incorporated. 1991.
14. Solargis. [Accessed on 10.03.2023]. URL: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>.

## АВТОР

Ионова Евгения Александровна, науч. сотр. ФТИ им. А. Ф. Иоффе, лаб. фотоэлектрических преобразователей. Область интересов: концентраторная фотовольтаика  
ORCID ID 0000-0003-2886-6706

in  $K_w$  is the break shift of the  $p$ - $n$  junction that limits the SC current, to the left on the AM scale, leading to a decrease in the SC current (Fig. 2).

## 5. ASSESSMENT ISSUE OF ACTUAL ENERGY GENERATION

The actual electricity generation during the annual period is lower than the limit value described in paragraph 3, due to the fact that either the absorbing and scattering atmospheric properties are enhanced or the direct radiation is completely absent due to shading by the clouds. To assess the actual power generation in the selected area, it is necessary to consider the actual annual energy input. In this case, it is possible to use the available data on the annual energy input of direct solar radiation [14] and use the calculated energy yield ratios. In the regions with high atmospheric seasonality (for example, rainy seasons), the clarification may be required, for which it is necessary to repeat the calculation procedure described in the article with a breakdown by season. The energy yield ratio value can be selected based on the atmospheric aerosol content in the region. Moreover, it is necessary to consider a decrease in the energy yield depending on the type of power plant, due to the optical losses when concentrating the DSR and electrical losses for the solar cell switching.

For example, at a latitude of 30° (in the case of a second type atmosphere throughout the year), a solar cell with 4  $p$ - $n$  junctions has  $K_{w\varphi}=42.59\%$  (Fig. 6), and the annual irradiation in relation to the materials [14] is 2350 kWh/m<sup>2</sup>. Thus, the annual energy yield of a given solar cell can be estimated as 1001 kWh/m<sup>2</sup> with an accuracy up to the difference between the real atmospheric composition and atmosphere of the second type. The energy yield of the photovoltaic module and the entire power plant with this solar cell will be reduced by the value of about 10–20%, determined by the design parameters of a particular system.

## CONCLUSION

This paper proposes the annual energy yield assessment method for the multijunction photoconverters by the example of solar cells with 1–6  $p$ - $n$  junctions and record-breaking efficiency. It is shown that the annual generation can be estimated on the basis of energy yield ratio that turns out to be lower than the value determined for the AM1.5 spectrum. The energy yield ratio varies depending on the atmosphere aerosol filling.

## AUTHOR

Evgenia A. Ionova, research fellow at the Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia, lab. photoelectric converters. Area of interest: concentrator photovoltaics  
ORCID ID 0000-0003-2886-6706



Главное событие отрасли  
в России и странах СНГ

# ФОТОНИКА

МИР  
ЛАЗЕРОВ  
И ОПТИКИ

## 26–29 марта 2024

18-я международная специализированная выставка  
лазерной, оптической и оптоэлектронной техники

Реклама



12+

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

[www.photonics-expo.ru](http://www.photonics-expo.ru)



ЛАЗЕРНАЯ АССОЦИАЦИЯ

65 ЭКСПОЦЕНТР