



УДК 621.383.4:620.91

Е.С. Аронова, В.М. Емельянов, М.З. Шварц

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭНЕРГОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
МНОГОПЕРЕХОДНЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ А³В⁵
С ОПТИЧЕСКИМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ В РАЗЛИЧНЫХ
ГЕОГРАФИЧЕСКИХ РАЙОНАХ**

E.S. Aronova, V.M. Emelyanov, M.Z. Shvarts,

Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences
26 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia

**PREDICTION OF ENERGY PERFORMANCE
OF MULTI-JUNCTION A³B⁵ PHOTOCONVERTERS WITH OPTICAL
CONCENTRATORS IN DIFFERENT GEOGRAPHIC REGIONS**

В статье исследована реакция рабочих характеристик многопереходных фотопреобразователей А³В⁵ с оптическими концентраторами на изменение спектрального состава солнечного излучения в различных климатических поясах Земли. Получены оценки энергопроизводительности фотопреобразователей в нескольких географических районах. Показано, что погрешность прогнозирования выработки электроэнергии может составлять до 16 % при отсутствии учета изменения КПД фотопреобразователя при вариации спектрального состава падающего излучения.

СОЛНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ, МНОГОПЕРЕХОДНЫЙ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ФОТО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ, ВЫРАБОТКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.

In the paper the simulation of the response of the working parameters of multijunction A³B⁵ photoconverters with optical concentrators on the change in the spectral composition of the solar radiation in different climatic conditions has been performed. Energy production of the photoconverters in several geographical locations was estimated. It was shown that inaccuracy of prediction of the energy production might be up to 16 % high in the case of neglecting photoconverter efficiency changing under the incident light spectral composition variation.

SOLAR CELL, MULTI-JUNCTION PHOTOCONVERTER, PHOTOVOLTAIC MODULE, ENERGY PRODUCTION.

При проектировании солнечных фотоэлектрических установок (СФЭУ) решается задача достоверной оценки текущей мощности и годовой выработки электроэнергии СФЭУ при функционировании в заданном географическом районе. Для этого выполняется прогнозирование энергопроизводительности фотоэлектрических модулей (ФЭМ), используемых в установках, в климатических условиях поступления солнечного излучения, соответствующих рассматриваемому пункту эксплуатации.

На сегодняшний день общемировой

практикой является публикация производителями характеристик солнечных элементов (СЭ) и ФЭМ с концентраторами солнечного излучения (СИ) только для стандартных условий испытаний: спектр излучения – АМ 1,5D LAOD, энергетическая освещенность – 1000 Вт/м², температура – 25 °С. Здесь обозначение «АМ1,5» относится к солнечному свету, прошедшему в атмосфере путь, равный полтора ее толщине (АМ – сокращение от англ. «Air mass» – воздушная масса). Аналогично «АМ2» соответствует световому излучению,

прошедшему путь, равный двум толщинам атмосферы, и т. д. Буква «D» обозначает спектр, в котором учитываются только фотоны прямого светового потока (именно они преобразуются в ФЭМ с оптическими концентраторами). Аббревиатура LAOD расшифровывается как Low Aerosol Optical Depth и означает малое содержание взвешенных аэрозолей в атмосфере.

В то же время является очевидным существенное отличие стандартных условий от действительных характеристик солнечного излучения, наблюдаемых в течение года в различных географических районах. Реальный спектр СИ зависит от длины пути, проходимого лучами в атмосфере Земли (величины атмосферной массы АМ), а также от типа атмосферы в различных климатических поясах планеты [1]. Спектральный состав излучения оказывает особенно сильное влияние на эффективность монокристаллических многопереходных (МП) СЭ. Влияние спектрального состава СИ на расхождение фототоков в А³В⁵ МП СЭ, их параметры и величину годовой выработки электроэнергии было исследовано в работах [2–4]. В них было показано, что суммарная годовая выработка электроэнергии

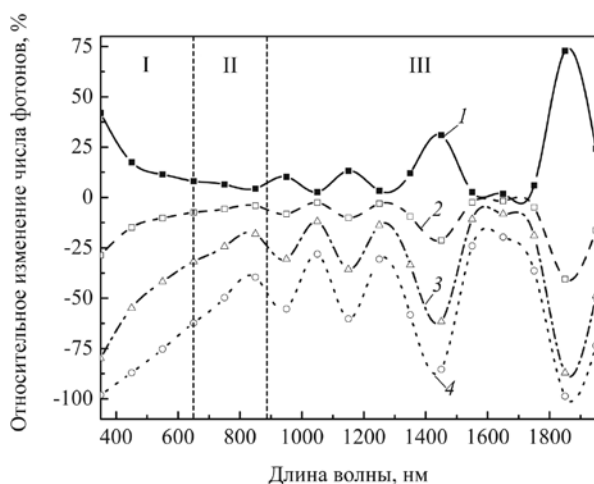


Рис. 1. Изменение числа фотонов в потоке излучения по сравнению со стандартом АМ 1,5 для спектров АМ 1 (1), АМ 2 (2), АМ 4 (3) и АМ 8 (4) Многопереходный солнечный элемент на структуре GaInP/ Ga(In)As/Ge Римскими цифрами пронумерованы субэлементы

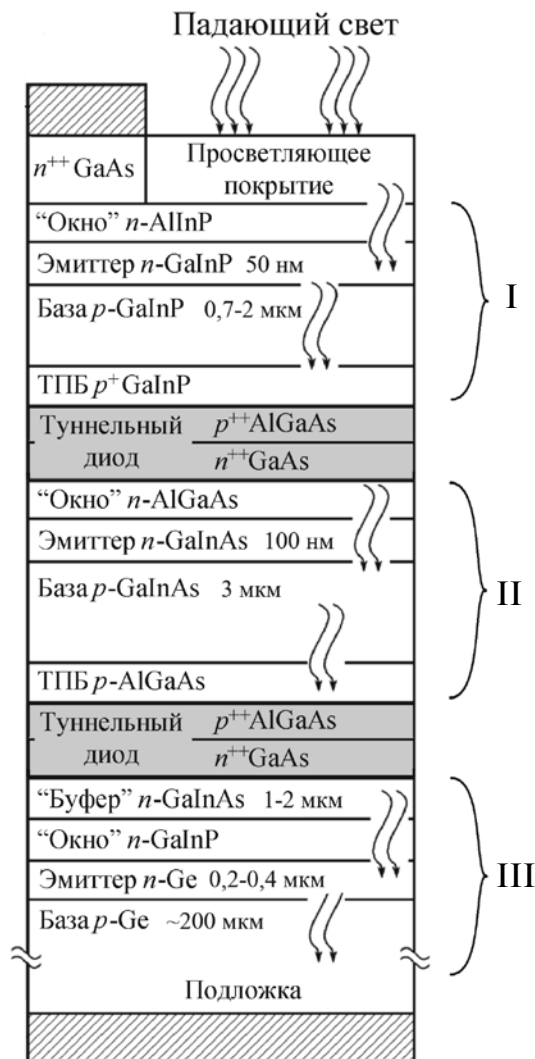


Рис. 2. Структура исследованного монокристаллического многопереходного солнечного элемента (МП СЭ) GaInP/Ga(In)As/Ge Римскими цифрами пронумерованы субэлементы

фотопреобразователем может оказаться до 3–4 % ниже оценки, полученной без учета реального спектрального состава солнечного излучения на поверхности элемента в процессе эксплуатации.

Таким образом, становится очевидной необходимость корректного учета реальных условий эксплуатации при прогнозировании энергопроизводительности СЭ и ФЭМ, функционирующих в солнечных фотоэлектрических установках. Кроме того, появляется задача оптимизации конструкции МП СЭ с учетом реальных условий их

функционирования; это позволит достичь высоких эксплуатационных характеристик ФЭМ в СФЭУ [5].

Причиной изменения эффективности ФЭМ в зависимости от географической широты места его эксплуатации является вариация состава излучения, приходящего на СЭ. Поглощение и рассеяние солнечного излучения в атмосфере Земли происходит неодинаково для различных длин волн. Зависимости относительного изменения числа фотонов в спектре солнечного излучения для различного числа воздушных масс, по сравнению с числом фотонов при AM1,5D, показаны на рис. 1, где для примера выделены спектральные диапазоны, соответствующие фотонам, поглощаемым в отдельных субэлементах типичного МП СЭ GaInP/Ga(In)As/Ge. Схематичное изображение его структуры приведено на рис. 2. Она включает три субэлемента, имеющих фотоактивные *p-n*-переходы, соединенные последовательно при помощи туннельных диодов. Каждый из субэлементов включает слои широкозонного окна, эмиттера, базы и тыльного потенциального барьера (ТПБ), в которых поглощается солнечное излучение. Моделирование спектральных составов излучения проводилось с помощью программы SMARTS2 [6].

Видно, что изменение толщины атмосферы, которую необходимо преодолеть солнечному свету, наиболее сильно влияет на количество фотонов в коротковолновом

(длина волны менее 650 нм) и длинноволновом (более 900 нм) диапазонах. Если, например, некоторый МП СЭ GaInP/Ga(In)As/Ge был согласован по фототокам субэлементов GaInP и Ga(In)As при спектре AM1,5D, то при увеличении оптического пути излучения в атмосфере (AM x , $x > 2$) происходит перевод МП СЭ в режим ограничения по фототоку верхним субэлементом. При уменьшении длины оптического пути (AM x , $1,0 < x < 1,5$) ограничение будет наблюдаться по фототоку субэлемента Ga(In)As. Возникающие при токовом рассогласовании потери приводят к снижению КПД фотопреобразователя.

В течение дня солнце находится над горизонтом на разной высоте, и спектральный состав солнечного излучения, поступающего на поверхность фотопреобразователя, меняется в соответствии со значением атмосферной массы в каждый момент времени. Средняя доля времени, в течение которого спектральный состав СИ характеризуется определенным числом атмосферных масс, зависит от широты местности (см. таблицу).

Существенное влияние на спектральный состав СИ на поверхности ФЭМ и СФЭУ оказывает и химический состав атмосферы, определяемый климатическими особенностями поясов Земли. Относительные различия в спектральной плотности энергетической освещенности для разных атмосфер достигают 1,3 % в диапазоне длин волн менее 650 нм, 30 % для длин волн от 650 до

Изменение спектра солнечного излучения в течение года

Число AM (Air Mass)	Доля времени в течение года для широты, %			Интегральная плотность потока излучения, Вт/м ²
	25°	50°	70°	
от 1,0 до 1,5	5,3	0	0	от 845 до 954
от 1,5 до 2,0	18,2	12,6	3,8	от 768 до 862
от 2 до 3	14,1	15,7	16,6	от 648 до 804
от 3 до 4	4,6	10,2	8,9	от 557 до 756
от 4 до 8	5,8	8,2	13	от 337 до 683

Примечания.

1. Число AM = 1,5 соответствует длине пути солнечного излучения, равной полуторной толщине пройденного атмосферного слоя (стандартное условие испытаний).
2. Представлена средняя доля времени, в течение которого спектральный состав излучения характеризуется определенным числом AM.

900 нм и до 150 % для диапазона от 900 до 1900 нм [5]. Это приводит к еще большему усложнению зависимости КПД и среднегодовой выработки электроэнергии ФЭМ на основе МП СЭ от района их применения.

В программном комплексе SMARTS2 при расчетах используются следующие базовые типы атмосфер:

- стандартная (U.S. Standard Atmosphere);
- арктического пояса;
- субарктического пояса;
- умеренного пояса;
- субтропического пояса;
- тропического пояса.

Атмосферы, за исключением стандартной и тропического пояса, имеют свои модификации для летнего и зимнего периодов. Данные типы атмосфер использовались в дальнейших расчетах.

В качестве основы для моделирования ФЭМ был выбран МП СЭ, ранее приобретенный и серийно производимый со структурой GaInP/GaAs/Ge [5], а также оптический концентратор на основе линзы Френеля из полимерного материала [7], изготовленный в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Фотопреобразователи данного типа обладают на сегодняшний день наибольшим КПД [8] и вместе с полимерными линзами Френеля, имеющими низкую себестоимость производства, могут быть использованы для создания коммерческих фотоэлектрических установок.

Исследованный МП СЭ имел квадратную форму с длиной грани 2,428 мм, площадь апертуры составляла 0,03979 см². Форма оптического концентратора – квадратная. Концентратор обеспечивал среднюю кратность концентрирования 400 × в апертуре МП СЭ при оптическом КПД от 85 до 88 %, в зависимости от спектрального диапазона.

Для МП СЭ были измерены спектральная и вольтамперная характеристики. По спектральной характеристике были рассчитаны плотности фототоков субэлементов, с использованием которых была промоделирована вольтамперная характеристика (ВАХ). Моделирование производилось при помощи распределенной трехмерной эквивалентной схемы [9]. Плотности темновых

токов и последовательного сопротивления варьировались для обеспечения согласования с экспериментальными зависимостями. Определенные этим образом параметры использовались в дальнейших вычислениях.

В МП СЭ со структурой GaInP/Ga(In)As/Ge управление перераспределением числа поглощаемых фотонов между субэлементами производится регулированием толщины GaInP субэлемента. Ее влияние на энергопроизводительность в различных географических районах должно было быть учтено. Для этого необходимо было обеспечить моделирование изменения фотоэлектрических характеристик исследованного МП СЭ при вариации толщины субэлемента. С учетом того, что структура МП СЭ, взятого в качестве прототипа, не была достоверно известна, моделирование производилось на базе близкой структуры, разработанной в ФТИ им. Иоффе РАН [9] (см. рис. 2). Параметры структуры варьировались для обеспечения наилучшего совпадения спектральных характеристик, рассчитываемых методом [10], с экспериментально измеренными.

Для промоделированной структуры удалось добиться практически полного совпадения расчетной спектральной характеристики с измеренной для серийного МП СЭ, при суммарной толщине эмиттера и базы субэлемента GaInP, равной 0,9 мкм. Диффузионные длины ННЗ соответствовали работе [5]. Расчетная характеристика обеспечивала несколько больший фототок субэлемента Ga(In)As, что было обусловлено существенным отражением света в области фоточувствительности данного субэлемента в серийном МП СЭ. Поскольку это явление не является характерным для всех МП СЭ со структурой GaInP/Ga(In)As/Ge, данная особенность элемента не была повторена.

Максимальный КПД серийного МП СЭ достигался при кратности концентрирования 1000× (спектр AM 1,5D LAOD) и составлял 38,2 %. Максимальный КПД промоделированного МП СЭ достигался при тех же условиях и составлял 39,1 %. При кратности концентрирования 400× (AM 1,5D LAOD) КПД серийного МП СЭ составлял 37,8 %, а КПД ФЭМ на его осно-

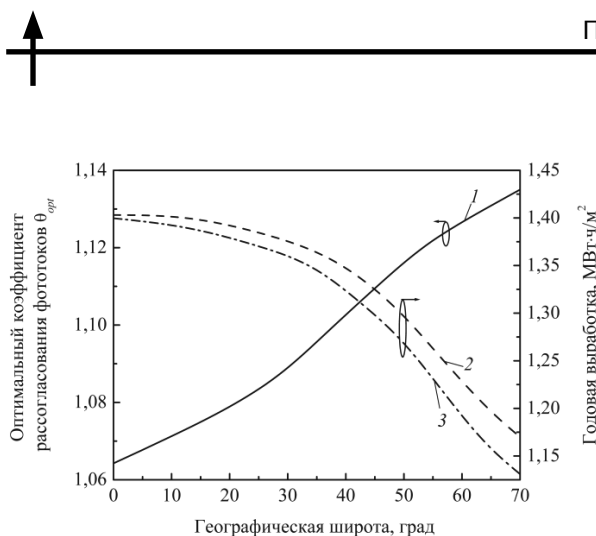


Рис. 3. Распределение по географическим широтам оптимального значения коэффициента рассогласования фототоков субэлементов GaInP и Ga(In)As в МП СЭ GaInP/ Ga(In)As/ Ge (1), а также величины суммарной годовой выработки ФЭМ на основе полимерной линзы Френеля и исследованного МП при $\theta = \theta_{opt}$ (2) и $\theta = 1$ (3)

ве с линзовым концентратором – 32,1 %. Для промоделированного СЭ соответствующие значения составили 38,7 и 32,3 %, соответственно.

Представленные в таблице данные показывают, что даже для тропических регионов большую часть времени года оптический путь солнечного излучения в атмосфере Земли превышает значение AM1,5. Для средних широт и приполярных областей основная доля излучения преодолевает удвоенную или утроенную толщину атмосферы. Это приводит к тому, что МП СЭ работает в условиях согласования по фототокку между субэлементами (спектр AM1,5D) и обеспечивает максимальную выработку электроэнергии лишь в короткие временные отрезки. Большая интегральная плотность потока излучения при малых числах атмосферной массы снижает влияние этого эффекта, но не подавляет его. Поэтому суммарная выработка электроэнергии СФЭУ с такими МП СЭ уступает теоретически достижимой.

В работе [5] были исследованы вопросы оптимизации МП СЭ GaInP/Ga(In)As/Ge для увеличения суммарной годовой выработки СФЭУ. В качестве критерия адаптации этого МП СЭ под географическую широту установки СФЭУ было пред-

ложено использовать отношение фототоков субэлементов GaInP и Ga(In)As при облучении их стандартным спектром AM1,5D LAOD:

$$\theta = J_{ph}^{GaInP} / J_{ph}^{Ga(In)As}. \quad (1)$$

Рассчитанная зависимость коэффициента θ , обеспечивающего максимальный КПД, в зависимости от широты размещения СФЭУ представлена на рис. 3. Там же приведены зависимости годовой выработки электроэнергии ФЭМ с концентратором на основе линзы Френеля и с МП СЭ GaInP/Ga(In)As/Ge. Параметры атмосферы при расчетах выбирались из списка стандартных атмосфер для SMARTS2 в зависимости от широты. Видно, что по мере удаления от экватора эффект от оптимизации начинает давать все больший вклад в общую энергопроизводительность ФЭМ и СФЭУ.

В реальных условиях эксплуатации выработка СФЭУ может оказаться более низкой. При этом вклады от оптимизации структуры в энергопроизводительность различаются. Причинами этого могут быть факторы, характерные для конкретной точки размещения СФЭУ. К ним относятся:

- влажность и запыленность атмосферы;
- изменение метеоусловий в течение года, количество ясных дней;
- изменение метеоусловий в течение дня.

На рис. 4 приведены результаты расчетов суммарной годовой выработки для пяти характерных точек размещения СФЭУ. При этом отображены величины выработок при использовании в ФЭМ как идеального, так и реального концентраторов излучения. Видно, что общая динамика различий между оптимизированной и неоптимизированной структурами совпадает с полученной в реальных условиях.

Также на рис. 4 изображены величины выработок, рассчитанные в предположении, что КПД МП СЭ является постоянным и не зависит от широты. Видно, что такой подход, успешно применяемый при оценке выработки СФЭУ на основе однопереходных СЭ, приводит к значительным погрешностям в данном случае.

Относительную погрешность прогнозирования годовой выработки ФЭМ можно

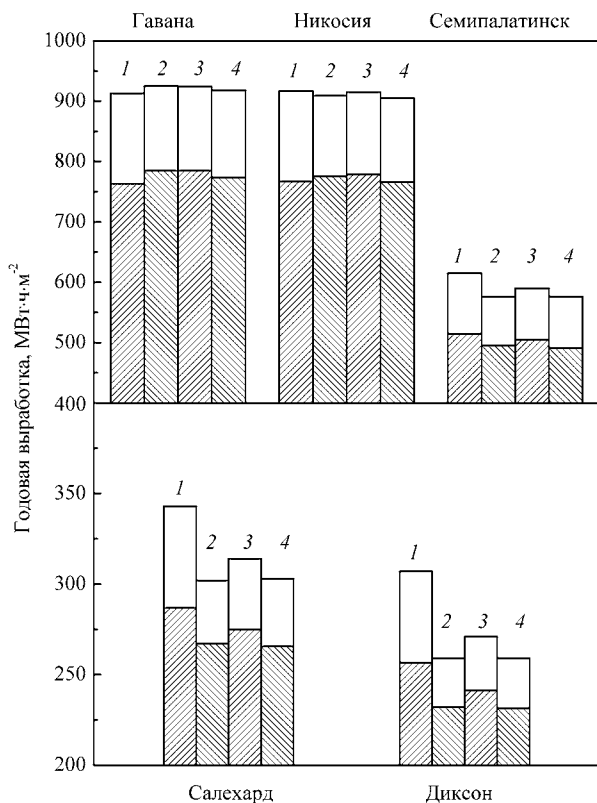


Рис. 4. Сравнительная оценка энергопроизводительности ФЭМ на основе исследованных МП СЭ для различных регионов и условий: 1 – для постоянного КПД = 38,7 % (вне зависимости от региона); 2, 3 – ФЭМ с МП СЭ при $\theta = 1$ и θ_{opt} соответственно; 4 – ФЭМ с серийным МП СЭ; полые столбцы – оценки для идеального концентратора с кратностью 400×, заштрихованные – для исследованного, на основе линзы Френеля

представить в следующей форме:

$$\xi = [(Q_{eff, const} - Q) / Q_{eff, const}] 100\%, \quad (2)$$

где Q – величина фактической выработки электроэнергии, а $Q_{eff, const}$ – величина выработки при отсутствии учета изменения КПД МП СЭ.

Расчетные значения погрешностей для исследованных районов установки представлены на рис. 5. Для ФЭМ на основе МП СЭ $\theta = 1$ и $\theta = \theta_{opt}$, погрешность оценивалась в сравнении ФЭМ с СЭ, имеющим КПД = 38,7 %. Для ФЭМ на основе исследованного серийного МП СЭ оценка производилась в сравнении с ФЭМ с СЭ, имеющим КПД = 37,8 %, которое данный

МП СЭ имеет при облучении светом с кратностью 400 ×.

Из рис. 5 несложно видеть, что погрешность увеличивается по мере удаления от экватора. При этом, если для Гаваны и Никосии реальная величина выработки будет превышать прогнозируемую, то эффективность применения СФЭУ в приполярных областях окажется заметно ниже ожидаемой. Погрешности для структур, оптимизированных по соотношению фототоков субэлементов GaInP и Ga(In)As, оказываются меньше, чем для согласованных для спектра AM1,5D, однако все равно достаточно высоки. Различие между значениями погрешностей для идеального и реального концентраторов объясняется спектральной зависимостью оптических потерь в линзовом концентраторе, которые максимальны в спектральных диапазонах фоточувствительности субэлементов GaInP и Ge.

Анализ данных, представленных на рис. 4 и 5, показывает, что суммарная годовая выработка СФЭУ существенно зависит от географических координат пункта эксплуатации.

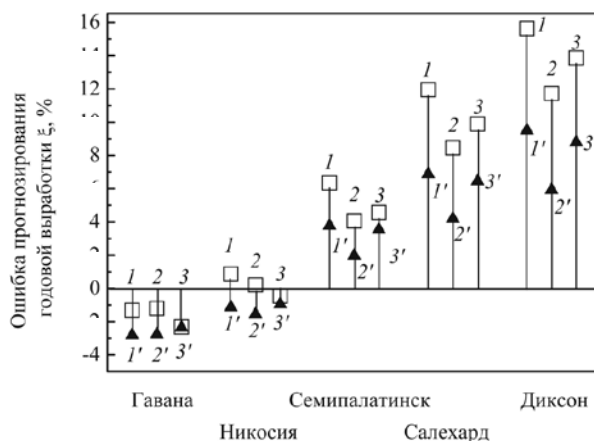


Рис. 5. Сравнение погрешностей оценок энергопроизводительности ФЭМ, сделанных без учета зависимости КПД СЭ от спектра излучения для различных регионов и условий: ФЭМ с МП СЭ при $\theta = 1$ (1, 1') и $\theta = \theta_{opt}$ (2, 2'); ФЭМ с серийным МП СЭ (3, 3').

Символы с номерами 1 – 3 соответствуют использованию в ФЭМ идеального концентратора с кратностью 400×, с номерами 1' – 3' – использованию линзы Френеля



При прогнозировании энергопроизводительности СФЭУ на основе МП СЭ необходимо осуществлять расчеты с учетом изменения КПД последних в разных условиях облучения. Пренебрежение изменением КПД СФЭУ на основе МП СЭ GaInP/Ga(In)As/Ge в зависимости от инсоляционных условий пункта эксплуатации приводит к занижению значений ожидаемой выработки электроэнергии до 2 % для экваториальных областей и их завышению на величину от 6 до 16 % при инсталляциях в средних и приполярных широтах. Использование оптимизированных (по соотношению фототоков GaInP и Ga(In)As

субэлементов) МП СЭ GaInP/Ga(In)As/Ge для различных географических широт является предпочтительным, так как позволяет получить ФЭМ и СФЭУ на их основе с энергетическими характеристиками, более подходящими для данного места эксплуатации. Кроме того, погрешность прогнозных оценок энергопроизводительности СФЭУ на основе оптимизированных МП СЭ оказывается ниже на 2–4 %, чем для оценок, не учитывающих непостоянство КПД.

Работа выполнена при поддержке гранта президента Российской Федерации для молодых ученых МК-2041.2012.8 и гранта РФФИ № 12-08-00354.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Елистратов, В.В.** Солнечные энергоустановки. Оценка поступления солнечного излучения [Текст]: Учебное пособие, под ред. В.В. Елистратова / В.В. Елистратов, Е.С. Аронова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 164 с.

2. **Faine, P.** The influence of spectral solar irradiance variations on the performance of selected single-junction and multijunction solar cells [Текст] / P. Faine, S.R. Kurtz, C. Riordan, J.M. Olson // *Solar Cells*. – 1991. – Vol. 31. – № 3. – P. 259–278.

3. **Araki, K.** Influences of spectrum change to 3-junction concentrator cells [Текст] / K. Araki, M. Yamaguchi // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2003. – Vol. 75. – P. 707–714.

4. **Peharz, G.** A simple method for quantifying spectral impacts on multi-junction solar cells [Текст] / G. Peharz, G. Siefert, A.W. Bett // *Solar Energy*. – 2009. – Vol. 83. – P. 1588–1598.

5. **Аронова Е.С.** Анализ энергопроизводительности концентраторных фотоэлектрических модулей на основе солнечных элементов со структурой GaInP/Ga(In)As/Ge в различных географических районах [Текст] / Е.С. Аронова, В.М. Емельянов, М.З. Шварц // *Гелиотехника*. – 2012. – № 3. – С. 66–74.

6. **Myers, D.R.** Proposed reference spectral ir-

radiance standards to improve concentrating photovoltaic system design and performance evaluation [Текст] / D.R. Myers, K. Emery // *Proc. 31st IEEE PVSC on CD*. – 2002. – P. 923–926.

7. **Andreev, V.M.** Weakening of the chromatic aberration negative effect on the performance of concentrator multi-junction solar cells [Текст] / V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, A.A. Soluyanov [и др.] // *Proc. 22nd EPSEC on CD*. – 2007. – P. 126–132.

8. **Green, M.A.** Solar cell efficiency tables (version 41) [Текст] / M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa [и др.] // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. – 2012. – Vol. 21. – № 1. – P. 1–11.

9. **Емельянов, В.М.** Оптимизация концентраторных солнечных элементов на основе структур GaInP/Ga(In)As/Ge [Текст] / В.М. Емельянов, Н.А. Калюжный, М.А. Минтаиров [и др.] // *Научно-технические ведомости СПбГПУ: Физико-математические науки*. – 2011. – № 1 (116). – С. 11–18.

10. **Емельянов, В.М.** Внешний квантовый выход фотоответа каскадных солнечных элементов [Текст] / В.М. Емельянов, С.А. Минтаиров, Н.А. Калюжный, В.М. Лантратов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ: Физико-математические науки*. – 2009. – № 2 (77). – С.14–27.

REFERENCES

1. **Elistratov V.V., Aronova E.S.** Solnechnye energoustanovki. Ocenka postupleniya solnechnogo izlucheniya: uchebnoe posobie, pod red. V.V. Elistratova. St. Petersburg, Izdatel'stvo Politekhnikeskogo universiteta, 2012, 164 p. (rus)

2. **Faine P., Kurtz S.R., Riordan C., Olson J.M.** The influence of spectral solar irradiance

variations on the performance of selected single-junction and multijunction solar cells. *Solar Cells*, 1991, Vol. 31 (3), pp. 259–278.

3. **Araki K., Yamaguchi M.** Influences of spectrum change to 3-junction concentrator cells. *Sol. En. Mat. & Solar Cells*, 2003, Vol. 75, pp. 707–714.

4. Peharz G., Siefer G, Bett A.W. A simple method for quantifying spectral impacts on multi-junction solar cells. *Solar Energy*, 2009, Vol. 83, pp. 1588–1598.

5. Shwarz M.Z., Aronova E.S., Emelianov V.M. Analysis of power efficiency of concentrator photovoltaic modules based on solar cells with GaInP/Ga(In)As/Ge structure in various geographic regions. *Applied Solar Energy*, 2012, Vol. 48 (3), pp.203–212.

6. Myers D.R., Emery K. Proposed reference spectral irradiance standards to improve concentrating photovoltaic system design and performance evaluation. Proc. 31st IEEE PVSC on CD, 2002, pp. 923 – 926.

7. Andreev V.M., Grilikhes V.A., Soluyanov A.A., Timoshina N.H., Vlasova E.V. Shvarts M.Z. Weakening of the chromatic aberration negative effect on the performance of concentrator multi-

junction solar cells. Proc. 22nd EPSEC on CD, 2007, pp. 126–132.

8. Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E.D. Solar cell efficiency tables. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2012, Vol. 21 (1), pp. 1–11.

9. Emelyanov V.M., Kalyuzhniy N.A., Mintairov M.A., Mintairov S.A., Shvarts M.Z., Lantratov V.M. Optimization of the concentrator three-junctional solar cells. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and mathematics*, 2011, No. 1(116), pp. 11–18. (rus)

10. Emelyanov V.M., Mintairov S.A., Kalyuzhniy N.A., Lantratov V.M. The external quantum yield of photoresponce of tandem solar cells. *St.-Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and mathematics*, 2009, No. 2(77), pp. 14–27. (rus).

АРОНОВА Екатерина Сергеевна – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории фотоэлектрических преобразователей Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
earonova@mail.ioffe.ru

ЕМЕЛЬЯНОВ Виктор Михайлович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории фотоэлектрических преобразователей Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
resso2003@bk.ru

ШВАРЦ Максим Зиновьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории фотоэлектрических преобразователей Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
shvarts@scell.ioffe.ru