

Годовые зависимости генерируемой мощности и электроэнергии для солнечных элементов на основе α -Si:H

© Ю.В. Крюченко,¹ А.В. Саченко,¹ А.В. Бобыль,² В.П. Костылев,¹
И.О. Соколовский,¹ Е.И. Теруков,^{2,3} В.Н. Вербицкий,² Ю.А. Николаев^{2,3}

¹ Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины,
03028 Киев, Украина
e-mail: sach@isp.kiev.ua

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 30 января 2013 г.)

Для солнечных элементов (СЭ) на основе α -Si:H рассчитаны годовые зависимости мощностей и энергий, генерируемых единицей площади СЭ на широтах 45°N , 50°N , 55°N , 60°N и в конкретных географических пунктах России. Нормировка этих зависимостей позволяет получить представление о соответствующих годовых зависимостях для СЭ на основе других полупроводников. В совокупности с данными о среднем числе солнечных дней в году (или о суммарной продолжительности солнечного сияния за год) для конкретных районов России это позволяет, в частности, судить о перспективности этих районов для строительства солнечных электростанций. В результате определены регионы России, для которых превышение над усредненными величинами электроэнергии, производимой солнечными электростанциями, может доходить до 24%.

1. Введение

В наших предыдущих работах [1,2] была представлена математическая модель, позволяющая рассчитывать основные фотоэнергетические параметры СЭ на основе α -Si:H (ток короткого замыкания, напряжение разомкнутой цепи, фактор заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ), генерируемую оптимальную мощность и коэффициент полезного действия) при неконцентрированном солнечном освещении в произвольный день года и произвольное время дня. В работе [2] были проиллюстрированы результаты расчетов для географической широты 45°N в день равноденствия. В настоящей работе на основе этой модели рассчитаны годовые зависимости максимально возможной (т.е. без учета облачности и других неблагоприятных факторов) мощности фотопреобразования СЭ на основе α -Si:H для широт 45°N , 50°N , 55°N и 60°N . Расчет проведен для 8-часового промежутка дня с шагом в 1 h, начиная с момента нахождения Солнца в зените. Поскольку конкретное значение долготы в этом случае несущественно, то этот промежуток соответствует 12–20 h дня гринвичскому GMT(UTC)-времени на нулевом меридиане. Кроме этого, для этих широт рассчитаны годовые зависимости максимально возможной энергии, генерируемой единицей площади таких СЭ. В работе приведены также результаты расчетов для набора конкретных географических пунктов России с учетом усредненных за 22 г. помесечных данных NASA по облачности, температуре, давлению и другим параметрам в этих пунктах. В совокупности полученные результаты дают возможность судить о перспективности строительства солнечных электростанций в тех или иных районах России.

2. Методика расчета

В настоящей работе расчет проведен на основе модели [1,2] для случая ориентации СЭ строго на юг, нормаль к поверхности которого направлена в точку нахождения Солнца в зените в день весеннего или осеннего равноденствия, т.е. под углом α относительно нормали к поверхности Земли, который равен широте места расположения СЭ.

Изложенная в [2] модель солнечного спектра при произвольных углах падения солнечного излучения основана на первой части работы [3]. Как следствие, этот спектр фактически является спектром прямого солнечного излучения (Direct Normal Irradiance), не учитывающего дополнительного вклада конуса $2.5\text{--}3.5^\circ$ вокруг направления на Солнце (Circumsolar Radiation) и диффузного и отраженного от Земли излучения. В настоящей работе для более реальной оценки мощностей генерации СЭ и энергии, вырабатываемой в течение светового дня, спектр падающего на СЭ излучения задавался в виде рассчитанного в соответствии с [2], но с корректирующим коэффициентом 1.41. Данный коэффициент получен в результате сравнения равного 70.93 mW/cm^2 интеграла по спектру прямого падающего солнечного излучения, рассчитанного в соответствии с [2,3] на широте 48.2°N в 12 h дня в день равноденствия (что соответствует условиям AM1.5), и известной интегральной величины 100.3 mW/cm^2 для полного (Global) солнечного спектра AM1.5G, учитывающего наряду с вкладом прямого солнечного излучения все перечисленные выше дополнительные вклады. В принципе для более строгого учета вклада диффузного излучения при

произвольных углах нахождения Солнца над горизонтом можно было бы воспользоваться моделью, изложенной во второй части работы [3], но такой подход требует знания большого количества дополнительных параметров.

Величины E электроэнергии, генерируемой СЭ на основе a -Si:H в тот или иной день, находились следующим образом. Исходя из рассчитанных оптимальных мощностей генерации $P(t_i)$ при различных значениях дневного времени (начиная с $t_0 = 12$ h дня с промежутком в $\Delta t = 1$ h и кончая временем захода солнца t_{sunset} [2]), находилась сумма от произведения средних значений мощностей $0.5[P(t_i) + P(t_{i+1})]$ в промежутках $t_i - t_{i+1}$ на величину $\Delta t = t_{i+1} - t_i = 1$ h на целочисленных интервалах времени $t_i - t_{i+1}$ и добавлялось значение энергии на нецелочисленном интервале $\text{Int}(t_{\text{sunset}}) - t_{\text{sunset}}$, где $\text{Int}(x)$ означает целую часть числа x :

$$E = 2 \left[\sum_{t=12}^{\text{Int}(t_{\text{sunset}})-1} 0.5[P(t) + P(t+1)] + 0.5P(\text{Int}(t_{\text{sunset}}))(t_{\text{sunset}} - \text{Int}(t_{\text{sunset}})) \right]. \quad (1)$$

Двойка перед квадратной скобкой учитывает вклад первой половины дня от восхода солнца до 12 h дня.

Таким образом были рассчитаны максимально возможные (т.е. без учета облачности и других неблагоприятных факторов) мощности фотообразования СЭ на основе a -Si:H и генерируемые ими энергии для широт 45°N , 50°N , 55°N и 60°N .

В случае конкретных географических пунктов России эти симметричные относительно времени нахождения Солнца в зените максимально возможные мощности умножались на соответствующие понижающие коэффициенты солнечного сияния $K_{s,s} = (1 - K_{\text{cloudiness}})$, где $K_{\text{cloudiness}}$ — коэффициенты облачности. Коэффициенты облачности (точнее, проценты облачности) для любого географического пункта можно найти на сайте NASA [4]. Проценты облачности приведены на этом сайте с трехчасовыми промежутками с 0 до 24 h по GMT(UTC)-времени для всех двенадцати месяцев года на основании усреднения данных за 22 г. наблюдений с 1983 по 2005 г. Кроме того, на этом же сайте имеются помесечные данные по давлению p (знание p необходимо для расчета коэффициентов ослабления спектра АМО, связанных с рэлеевским рассеиванием излучения в атмосфере и с поглощением парами воды [2,3]), высоте столба преципитата водяного пара $n_{\text{H}_2\text{O}}$ (этот параметр в дополнение к p также необходим для расчета коэффициента ослабления, связанного с поглощением парами воды), температуре атмосферы T_a (знание величины T_a необходимо для расчета коэффициента ослабления, связанного с поглощением двуокисью азота NO_2 в случае ее наличия в тропосфере) и относительной влажности RH (знание RH необходимо для расчета вклада аэрозольной экстинкции в ослабление солнечного спектра). Остальные параметры, необходимые для расчета всех шести

коэффициентов ослабления [2,3], ввиду отсутствия по ним данных NASA для конкретных географических пунктов задавались по эталонным значениям для зимних и летних атмосфер (табл. 1 работы [2]). Зимние значения приписывались дню зимнего солнцестояния, а летние — дню летнего солнцестояния с последующей линейной аппроксимацией между этими значениями для каждого из дней года в этом промежутке.

Координаты и высоты над уровнем моря большинства выбранных в данной работе географических пунктов можно найти на сайте [5]. Исключения составляли Большережье, Северное, Тобольск и Усть-Кан, для которых использовался сайт [6].

Данные по облачности на сайте NASA [4] приведены по времени нулевого меридиана. Зная временную разницу между моментами нахождения Солнца в зените на нулевом меридиане и на долготе выбранного географического пункта, данные по облачности при расчете характеристик СЭ пересчитывались относительно момента нахождения Солнца в зените в данном географическом пункте. Этот момент является „условными 12 h“ для данного географического пункта, и именно от него ведется отсчет времени при расчете мощностей $P(t_i)$ в формуле (1).

3. Результаты расчета

Расчеты годовых зависимостей характеристик СЭ на основе a -Si:H были проведены для следующего набора основных параметров: длина пути для тропосферного NO_2 $u_{\text{tr}} = 0$ atm-cm, видимость $V = 19$ km, параметры аэрозольной экстинкции соответствуют случаю сельской местности, содержание водорода в a -Si:H равно 10%, толщина p^+ -слоя $d_p = 0.135$ μm , толщина $i(n)$ -слоя $d = 0.18$ μm , толщина технологического n^+ -слоя $d_n = 0.02$ μm , толщина слоя ИТО $d_{\text{ITO}} = 0.35$ μm , толщина SiO_2 -покрытия $d_{\text{SiO}_2} = 0.09$ μm , коэффициент металлизации фронтальной поверхности СЭ контактной сеткой $m = 0.05$, ширина „пальцев“ контактной сетки на фронтальной поверхности СЭ $L_F = 0.02$ μm , концентрация дырок в ИТО $n_p^{\text{ITO}} = 10^{19}$ cm^{-3} , плотность тока насыщения $j_s = 10^{-12}$ А cm^{-2} , фактор неидеальности $r = 1.5$, подвижность фотоэлектронов в p^+ -слое $\mu_n^{(p)} = 13$ $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, подвижность электронов в $i(n)$ -слое $\mu_n^{i(n)} = 13$ $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, время жизни фотоэлектронов в p^+ -слое $\tau_n^{(p)} = 10^{-9}$ s, время жизни электронов в $i(n)$ -слое $\tau_n^{i(n)} = 10^{-9}$ s, скорость поверхностной рекомбинации электронов на фронтальной поверхности СЭ $S_0 = 100$ cm/s , подвижность фотодырок в $i(n)$ -слое $\mu_p^{i(n)} = 0.67$ $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, подвижность дырок в p^+ -слое $\mu_p^{(p)} = 0.67$ $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, время жизни фотодырок в $i(n)$ -слое $\tau_p^{i(n)} = 10^{-9}$ s, время жизни фотодырок в p^+ -слое $\tau_p^{(p)} = 10^{-9}$ s, скорость поверхностной рекомбинации дырок на тыльной поверхности СЭ $S_d = 10$ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, подвижность дырок в слое ИТО $\mu_p^{\text{ITO}} = 25$ $\text{cm}^2 \cdot (\text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$, концентра-

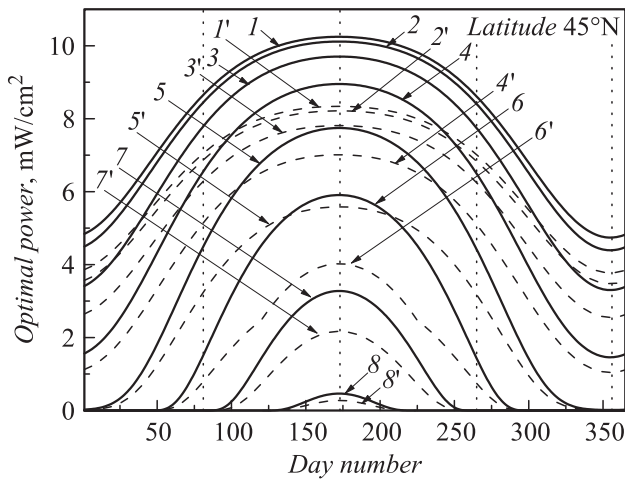


Рис. 1. Годовые зависимости мощности фотопреобразования единицы площади СЭ на основе a -Si:H на географической широте 45°N в отсутствие облачности: 1, 1' — 12; 2, 2' — 13; 3, 3' — 14; 4, 4' — 15; 5, 5' — 16; 6, 6' — 17; 7, 7' — 18; 8, 8' — 19 h дня. Кривые 1–8 соответствуют случаю рельефной поверхности СЭ, кривые 1'–8' — случаю гладкой поверхности СЭ.

ция доноров в $i(n)$ -области $N_{D0} = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, глубина залегания максимума гауссовского распределения донорных состояний по энергии $E_D = 0.2 \text{ eV}$, среднеквадратичная ширина распределения донорных состояний по энергии $\sigma_D = 0.1 \text{ eV}$, концентрация акцепторов в p^+ -области $N_{A0} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, глубина залегания максимума гауссовского распределения акцепторных состояний по энергии $E_A = 0.2 \text{ eV}$, среднеквадратичная ширина распределения акцепторных состояний по энергии $\sigma_A = 0.1 \text{ eV}$, характеристическая энергия хвоста $N_{ct}(E) = N_{ct0} \exp[(E - E_g)/E_{c0}]$ акцептороподобных состояний зоны проводимости в запрещенной зоне $E_{c0} = 0.025 \text{ eV}$, характеристическая энергия хвоста $N_{vt}(E, T) = N_{vt0} \exp(-E/E_{v0}(T))$ донороподобных состояний валентной зоны в запрещенной зоне $E_{v0}(300 \text{ K}) = 0.045 \text{ eV}$, корреляционная энергия для обусловленных оборванными связями глубоких состояний дефектов $u = 0.2 \text{ eV}$, эффективная масса электрона в a -Si:H $m_e = 2.78m_0$, эффективная масса дырки в a -Si:H $m_h = 2.34m_0$. Полная расшифровка физического смысла перечисленных параметров содержится в наших предыдущих работах [1,2].

Расчитанное количество часов солнечного сияния за год T_{ss}^m в идеальных условиях полного отсутствия облачности составляет 4379–4380 h для всех широт 45°N – 60°N .

На рис. 1–4 представлены результаты расчетов годовых зависимостей мощностей фотопреобразования, отнесенных к единице площади СЭ на основе a -Si:H с указанными выше параметрами, в идеальных условиях полного отсутствия облачности для широт 45°N , 50°N , 55°N и 60°N соответственно. Штриховые кривые на этих рисунках соответствуют случаю гладкой (зеркаль-

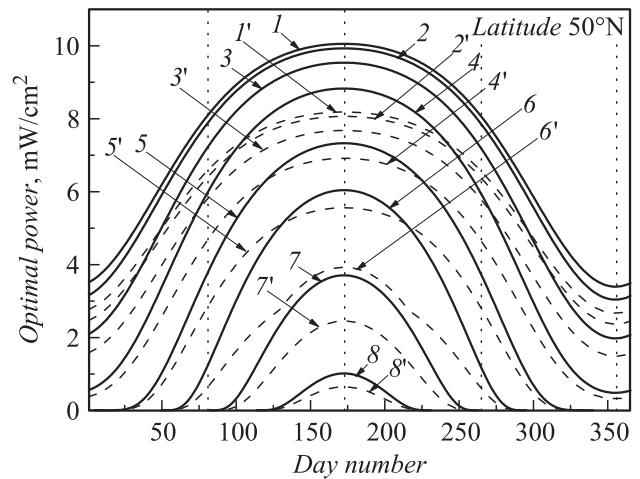


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, на географической широте 50°N .

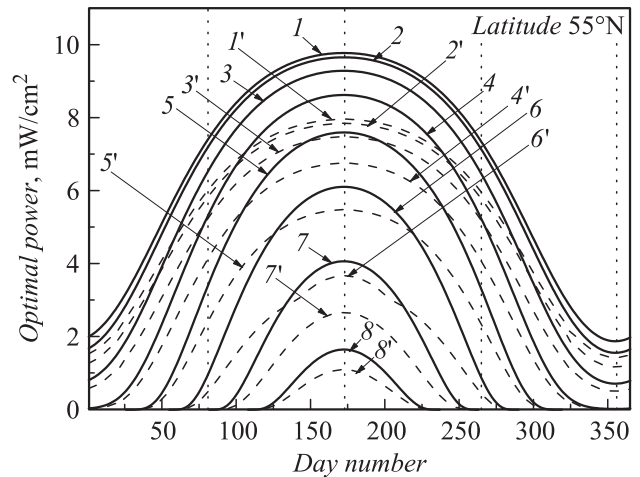


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, на географической широте 55°N .

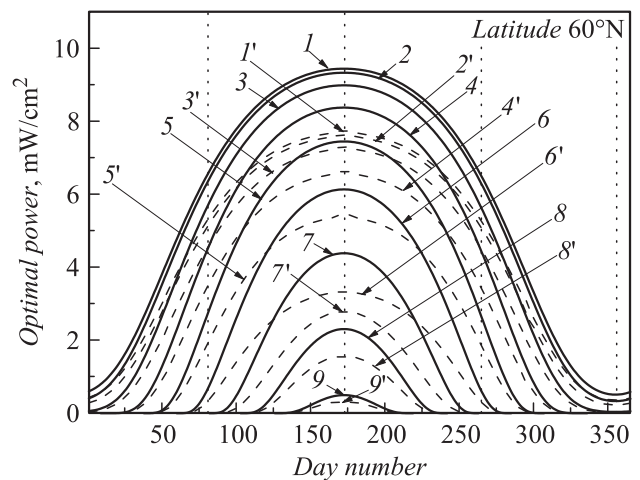


Рис. 4. То же, что и на рис. 1, на географической широте 60°N . 9, 9' — 20 h дня.

Таблица 1.

Широта	Генерируемая за год электроэнергия $E_Y, W \cdot h/cm^2$	
	СЭ с гладкой поверхностью	СЭ с развитой поверхностью
45°N	18.1	23.5
50°N	16.6	21.8
55°N	15.0	19.8
60°N	13.5	17.9

ной) фронтальной поверхности. В этом случае коэффициенты прохождения $T_{1 \rightarrow 4}^{p(s)}(\lambda)$ и отражения $R_{4 \rightarrow 1}^{p(s)}(\lambda)$ в функции генерации (см. выражение (11) нашей предыдущей работы [1])

$$g^{p(s)}(z, \lambda, \theta_s) = \frac{(1 - m)\alpha_\lambda I^{p(s)}(\lambda, \theta_s) T_{1 \rightarrow 4}^{p(s)}(\lambda)}{1 - R_{4 \rightarrow 1}^{p(s)}(\lambda) R_{4 \rightarrow 5}^{p(s)}(\lambda) \exp[-2\alpha_\lambda(d_p + d + d_n)]} \times \left\{ \exp(-\alpha_\lambda z) + R_{4 \rightarrow 5}^{p(s)}(\lambda) \times \exp[-2\alpha_\lambda(d_p + d + d_n)] \exp(\alpha_\lambda z) \right\} \quad (2)$$

(θ_s — угол падения солнечного излучения на поверхность Земли) рассчитывались согласно методу, изложенному в [1]. Сплошные кривые соответствуют случаю развитой (рельефной) поверхности, когда практически все падающее излучение поглощается в СЭ. В этом случае коэффициенты прохождения $T_{1 \rightarrow 4}^{p(s)}(\lambda)$ и отражения $R_{4 \rightarrow 1}^{p(s)}(\lambda)$ не рассчитывались, а просто полагались равными единице. Вертикальные пунктирные прямые на этих рисунках отмечают положение дней весеннего и осеннего равноденствия, а также летнего и зимнего солнцестояния.

Как видно из приведенных рисунков, по мере увеличения географической широты величины генерируемой мощности уменьшаются при временах, близких к полудню, и возрастают в вечерние часы, что связано с увеличением продолжительности светового дня в летний период года. Соответствующие зависимости для утренних часов (до 12 h дня) симметричны послеполуденным зависимостям.

На рис. 5 представлены результаты расчета по формуле (1) годовых зависимостей количества электроэнергии, производимой единицей площади СЭ на основе *a-Si:H* на широтах 45°N, 50°N, 55°N и 60°N в идеальных условиях отсутствия облачности. Генерируемые единицей площади СЭ годовые величины электроэнергии E_Y (сумма энергий, производимых на протяжении всех дней года), приведены для соответствующих широт в табл. 1. Как видно из этой таблицы, при увеличении географической широты электроэнергия, производимая за год, уменьшается.

В случае конкретных географических пунктов России величины электроэнергии E_Y , генерируемой за год единицей площади СЭ на основе *a-Si:H*, рассчитывались для СЭ с рельефной поверхностью. В табл. 2 указаны населенные пункты России, для которых производились расчеты в настоящей работе. Их выбор в основном осуществлялся исходя из имеющегося на данный момент дефицита выработки электроэнергии в соответствующих регионах России. Приведенные в этой таблице величины E_Y получены с учетом помесечных данных по облачности и другим параметрам, приведенным на сайте NASA [4] (в качестве примера см. табл. 3 и 4 для Абакана). В табл. 2 приведены также высота пункта над уровнем моря H , разница во времени Δt между моментами нахождения Солнца в зените на нулевом меридиане и на долготе населенного пункта, среднегодовой коэффициент солнечного сияния \bar{K}_{ss} и рассчитанное с учетом облачности количество часов солнечного сияния за год T_{ss} .

В табл. 3, иллюстрирующей учет облачности для района Абакана, указаны усредненные за 22 г. наблюдений помесечные трехчасовые данные сайта NASA [4] для этого региона по проценту облачности через каждые три часа начиная с 0 часов по UTC-времени. В табл. 4 приведены усредненные помесечные данные сайта NASA [4] для района Абакана по давлению p , высоте столба преципитата водяного пара u_{H_2O} , температуре атмосферы T_a и относительной влажности RH .

Рис. 6 в качестве примера иллюстрирует результаты расчета годовых зависимостей электроэнергии, производимой единицей площади СЭ на основе *a-Si:H* в районе Абакана при учете помесечных данных NASA [4] по облачности и другим параметрам, приведенным в табл. 3 и 4.

Результаты данной работы получены для СЭ на основе *a-Si:H* с максимальным КПД около 7.5%. Если

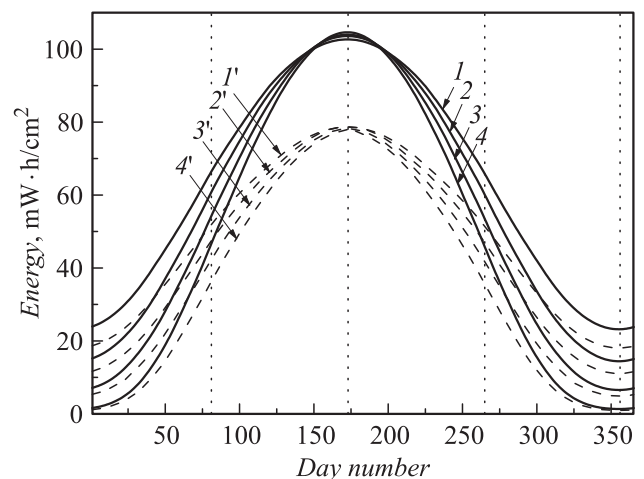


Рис. 5. Годовые зависимости электроэнергии, производимой единицей площади СЭ на основе *a-Si:H* в отсутствие облачности. Кривые 1 и 1' соответствуют широте 45°N, 2 и 2' — 50°N, 3 и 3' — 55°N, 4 и 4' — 60°N. Кривые 1–4 описывают случай СЭ с рельефной фронтальной поверхностью, а 1'–4' — с гладкой фронтальной поверхностью.

Таблица 2.

№	Населенный пункт	Координаты	H, m	$\Delta t, h$	\bar{K}_{ss}	$E_y, W \cdot h/cm^2$	T_{ss}, h
1	Абакан	53.72°N, 91.43°E	250	6.095	0.340	6.53	1451
2	Анжеро-Судженск	56.08°N, 86.04°E	230	5.736	0.375	7.17	1631
3	Ачинск	56.28°N, 90.50°E	220	6.033	0.362	6.80	1569
4	Барнаул	53.36°N, 83.75°E	190	5.585	0.379	7.66	1654
5	Бийск	52.57°N, 82.25°E	180	5.683	0.379	7.91	1665
6	Большеречье	56.09°N, 74.62°E	80	4.975	0.393	7.60	1727
7	Ишим	56.11°N, 69.49°E	80	4.630	0.394	7.51	1721
8	Канск	56.20°N, 95.71°E	200	6.381	0.346	6.38	1489
9	Кызыл	51.70°N, 94.45°E	630	6.297	0.340	6.27	1396
10	Лениногорск	54.60°N, 52.46°E	230	3.500	0.396	7.56	1703
11	Нижнеагарск	55.78°N, 109.55°E	470	7.303	0.351	6.05	1456
12	Нижневартовск	60.93°N, 76.57°E	50	5.105	0.359	6.12	1549
13	Новокузнецк	53.76°N, 87.11°E	200	5.807	0.374	7.38	1616
14	Петропавловск-Камчатский	53.02°N, 158.65°E	150	10.577	0.313	5.77	1313
15	Северное	56.35°N, 78.36°E	120	5.224	0.392	7.60	1725
16	Тайга	56.06°N, 85.62°E	250	5.708	0.380	7.25	1648
17	Тайшет	55.93°N, 97.99°E	320	6.533	0.337	6.36	1455
18	Тобольск	58.20°N, 68.27°E	100	4.551	0.377	6.83	1636
19	Усть-Кан	50.93°N, 84.76°E	1060	5.651	0.445	8.67	1850
20	Ханты-Мансийск	61.00°N, 69.00°E	50	4.600	0.355	6.11	1537

Таблица 3.

Месяц	UTC-время, h							
	0.00	3.00	6.00	9.00	12.00	15.00	18.00	21.00
Облачность								
1	—	65.4%	63.6%	62.4%	43.7%	—	—	—
2	57.8%	59.0%	60.1%	62.9%	59.9%	—	—	—
3	55.5%	62.4%	66.9%	67.2%	58.5%	—	—	—
4	60.4%	71.1%	77.7%	78.8%	70.0%	—	—	37.4%
5	66.9%	71.3%	75.2%	76.4%	69.8%	66.7%	—	62.7%
6	62.3%	66.3%	74.3%	76.4%	72.1%	70.0%	—	59.7%
7	56.8%	60.9%	69.3%	73.6%	67.9%	66.4%	—	53.6%
8	53.2%	58.0%	65.7%	70.4%	64.1%	58.6%	—	50.9%
9	61.4%	64.6%	69.7%	70.0%	65.0%	—	—	—
10	63.5%	67.0%	69.8%	70.8%	65.1%	—	—	—
11	65.4%	68.4%	70.0%	67.9%	—	—	—	—
12	—	68.0%	67.7%	66.3%	—	—	—	—

Таблица 4.

Месяц	Параметр			
	$p, mbar$	w_{H_2O}, cm	T_a, C	$RH, \%$
1	944	0.35	-16.5	76.9
2	943	0.35	-15.2	76.3
3	941	0.46	-9.94	76.1
4	936	0.68	-0.28	65.7
5	933	1.11	10.2	50.2
6	929	1.68	15.6	51.7
7	928	2.13	18.1	56.6
8	931	1.85	15.4	60.6
9	936	1.25	8.18	66.5
10	940	0.85	0.72	70.9
11	942	0.54	-8.98	74.8
12	943	0.4	-14.8	76.9

пронормировать кривые на рис. 1–4 на максимальную величину генерируемой мощности в 12h дня, а кривые на рис. 5 — на максимальную величину генерируемой энергии в день летнего солнцестояния, то соответствующие относительные величины генерируемых мощностей и энергий будут близки к аналогичным величинам для СЭ на основе других полупроводниковых материалов с КПД в диапазоне от 7 до 20%.

Результаты, аналогичные приведенным в табл. 1, можно получить для любой произвольной местности России. При знании фактического среднего числа солнечных

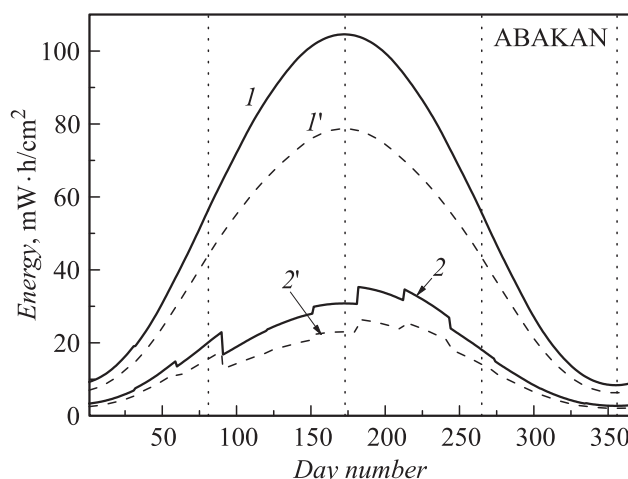


Рис. 6. Годовые зависимости электроэнергии, генерируемой единицей площади СЭ на основе a -Si:H в районе Абакана. Кривые 1 и 1' соответствуют идеальному случаю полностью безоблачного неба, кривые 2 и 2' — случаю учета данных NASA [4] по облачности и другим параметрам (см. табл. 3 и 4 данной работы). Кривые 1 и 2 — СЭ с рельефной поверхностью, 1' и 2' — СЭ с гладкой поверхностью.

дней в году или фактической суммарной продолжительности солнечного сияния за год для выбранных географических мест эти результаты позволяют судить о перспективности тех или иных районов России для строительства солнечных электростанций. В качестве примеров перспективности (на базе рассчитанных по данным NASA помесечных и почасовых коэффициентов солнечного сияния и суммарной продолжительности солнечного сияния за год) можно назвать район Усть-Кана, для которого рассчитанная годовая электроэнергия E_{γ} , производимая единицей площади СЭ на основе a -Si:H, превышает $8 \text{ W} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$, а также районы Анжеро-Судженска, Барнаула, Бийска, Большеречья, Ишима, Лениногорска, Новокузнецка, Северного и Тайги, для которых эта энергия превышает $7 \text{ W} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$. Если ограничиться величинами E_{γ} , превышающими $7.5 \text{ W} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$, то превышение производимой за год электроэнергии над усредненными значениями составит от 8 до 24%.

Список литературы

- [1] *Kryuchenko Yu.V., Sachenko A.V., Bobyl A.V., Kostilyov V.P.* et al. // *Semiconductor Physics, Quant. Electron. and Optoelectron.* 2012. Vol. 15. N 2. P. 91–116.
- [2] *Крюченко Ю.В., Саченко А.В., Бобыль А.В., Костылев В.П.* и др. // *ЖТФ.* 2013. Т. 83. Вып. 11. С. 78–85.
- [3] *Christian Gueymard*, SMARTS2: A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: algorithms and performance assessment (1995), <http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/FSEC-PF-270-95.pdf>.
- [4] <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/subset.cgi?email>.
- [5] <http://www.earthtools.org/>.
- [6] <http://dateandtime.info/ru/citycoordinates.php?id=>.