



# Некоторые результаты сравнительных испытаний фотоэлектрических модулей в условиях г. Москва

Тарасенко А.Б.

Лаборатория возобновляемых источников энергии Объединенного института высоких температур РАН, с.н.с

Школа молодых ученых «Высокоэффективные солнечные фотоэнергосистемы», ФТИ им. Иоффе, 7 ноября 2018 г.



# Основные направления деятельности Лаборатории

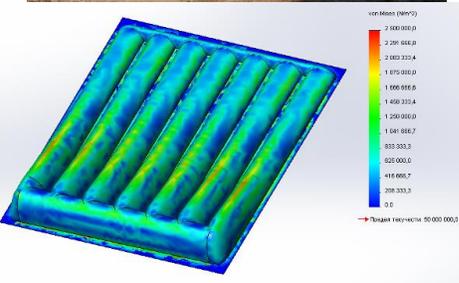


-оценка потенциала возобновляемых энергоресурсов

-математическое моделирование различных типов энергоустановок, использующих солнечную энергию

-разработка технических решений по созданию фотоэлектрических систем с современными накопителями электрической энергии, а также по созданию солнечных систем для горячего водоснабжения и отопления.

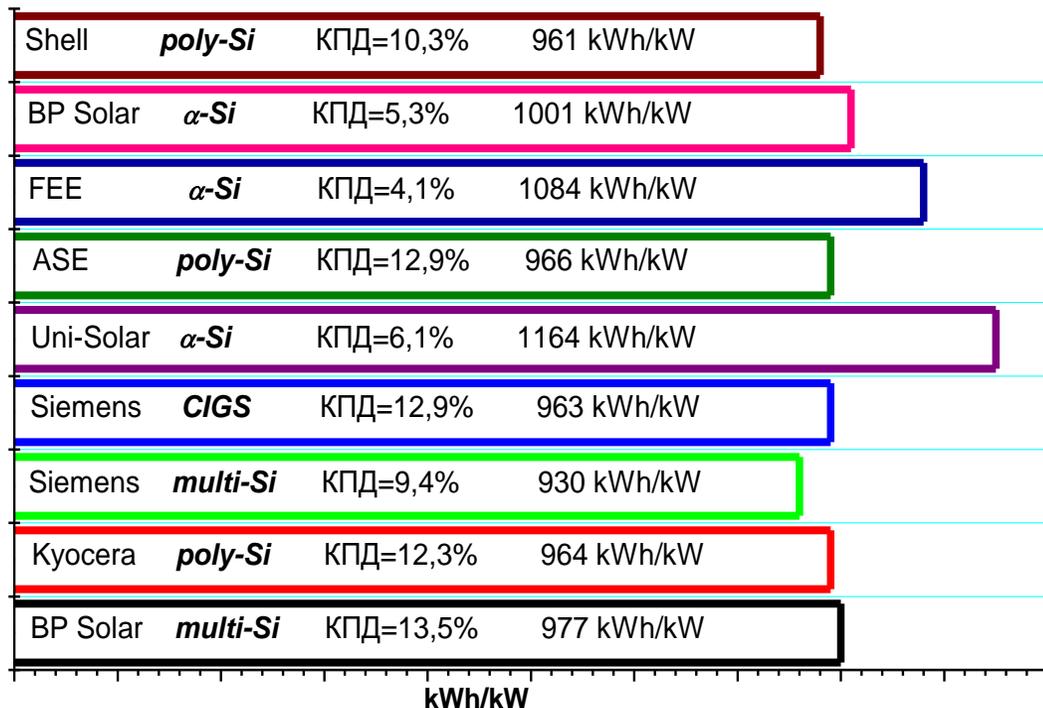
$$\begin{cases} U_d = \frac{R_L}{L_m} \Psi_d - \frac{R_s}{L_m} \Psi_{sd} + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \cdot \Psi_s; \\ U_s = \frac{R_L}{L_m} \Psi_s - \frac{R_s}{L_m} \Psi_{sd} + \frac{d\Psi_s}{dt} + \omega \cdot \Psi_d; \\ U_f = \frac{R_f}{L_{mf}} \Psi_f - \frac{R_f}{L_{mf}} \Psi_{mf} + \frac{d\Psi_f}{dt}; \\ 0 = \frac{R_{mf}}{L_{mf}} \Psi_{mf} - \frac{R_{mf}}{L_{mf}} \Psi_{sd} + \frac{d\Psi_{mf}}{dt}; \\ 0 = \frac{R_{mf}}{L_{mf}} \Psi_{sd} - \frac{R_{mf}}{L_{mf}} \Psi_{mf} + \frac{d\Psi_{sd}}{dt}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (m_s - m_c); \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega; \end{cases}$$





# Цели и задачи испытаний

Создание стенда начато в 2013-14 гг для фактической проверки выработки энергии фотоэлектрическими модулями на основе различных технологий в г. Москва



Результаты испытаний различных модулей в Нидерландах, 2006 г.

Основные задачи:

- Сравнение приведенной выработки тонкопленочных и кристаллических модулей в месячном и годовом разрезе.
- Оценка работоспособности двусторонних модулей в различных погодных условиях
- Технико-экономические оценки различных технологий фотоэнергетики с учетом реальной выработки

$$W_{PV} = U_{PV} * I_{PV} * \Delta t$$

Энергия, выдаваемая фотоэлектрическим модулем

$$w_m = \frac{\sum_{\Delta t} W_{PV}}{1000 * P_{peak}}$$

Приведенная выработка фотоэлектрического модуля

$$C_m^{sp} = \frac{C_m}{20 * W_{PV}^Y}$$

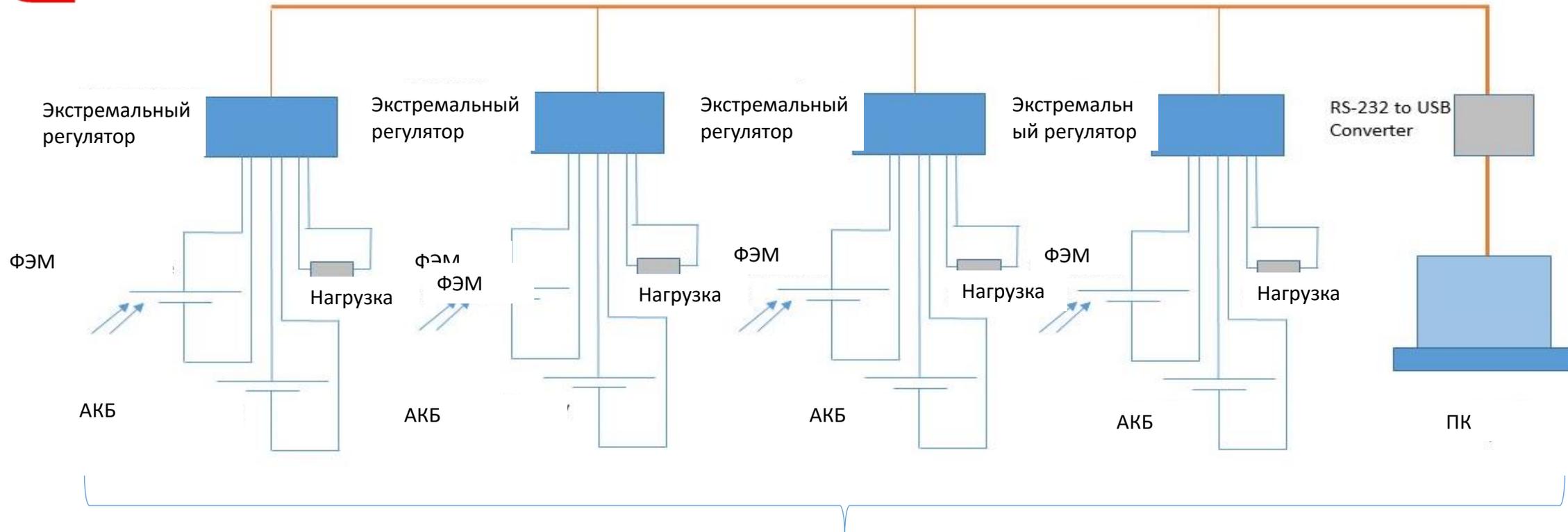
Приведенная стоимость энергии за 20 лет на основе капитальных затрат

$$A_{d(m)} = \frac{\sum_{\Delta t} A * \Delta t}{\sum \Delta t}$$

Среднесуточный уровень солнечной радиации, характеризующий погодные условия



# Схема стенда



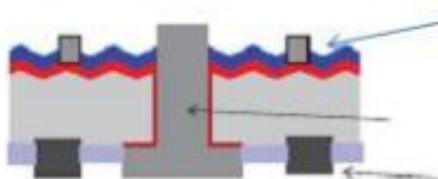
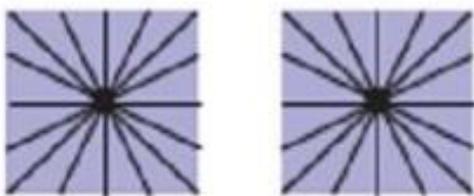
## Всего 8 каналов

- Экстремальный регулятор максимизирует мощность солнечной батареи
- АКБ малой емкости обеспечивает собственные нужды экстремального регулятора
- Мониторинг параметров каналов осуществлялся собственными средствами экстремальных регуляторов Morning Star, передача данных в ПК по интерфейсу rs232. Измеряются ток и напряжение в цепи фотоэлектрического модуля, напряжения нагрузки и аккумуляторной батареи
- Пиранометр Kipp and Zonnep использовался для измерения уровня солнечной радиации в плоскости модулей
- Сбор данных каждые три минуты. Расчетные параметры – мощность и энергия, выдаваемая каждым модулем.



# Технологии получения кристаллических кремниевых ФЭП с высокими значениями КПД

## Технология сквозных контактов MWT (Metal Wrap-Through)

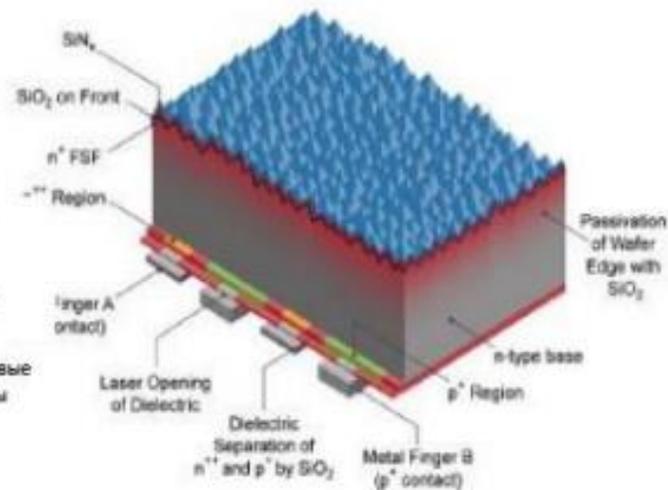


Серебряные «реснички»  
Серебряные контакты  
Алюминиевые контакты

*L.Cesar et al. / Energy Procedia 8 (2011) 672–680*



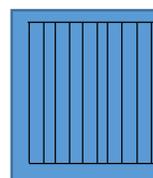
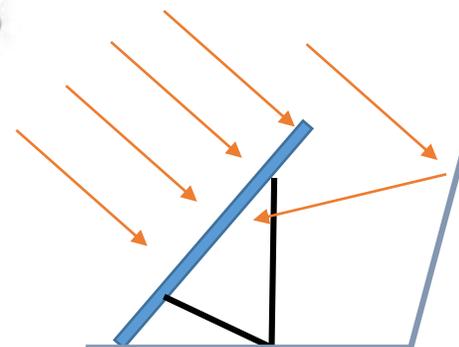
## Вынос контактов на тыльную сторону IBC (Interdigitated Back Contact)



*A. Goodrich et al. / Solar Energy Materials & Solar Cells 114 (2013) 110–135*

Данный вариант обеспечивает рекордные значения КПД, однако очень чувствителен к качеству исходных пластин

## Двусторонние фотоэлектрические модули на основе кристаллического кремния (n-PASHA, Солнечный ветер)



- Легирование тыльной стороны той же примесью, что и в материале пластины;
- Симметричные контакты;
- Использование пластин р-типа (Солнечный ветер) и n-типа (n-PASHA)

- Возможность использования тыльной стороны для генерации электрической энергии;
- Выработка сильно зависит от подстилающей поверхности и типа падающего излучения;

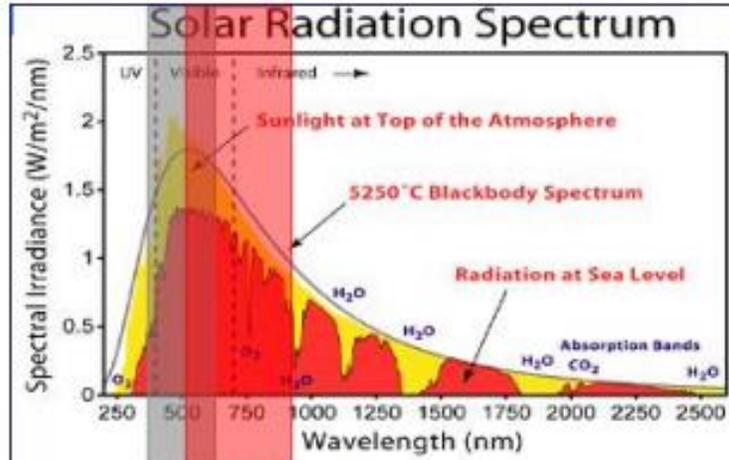


Схема ФЭП по технологии n-PASHA

ФЭС 500 кВт с двусторонними модулями на треккерах (Крумлов)



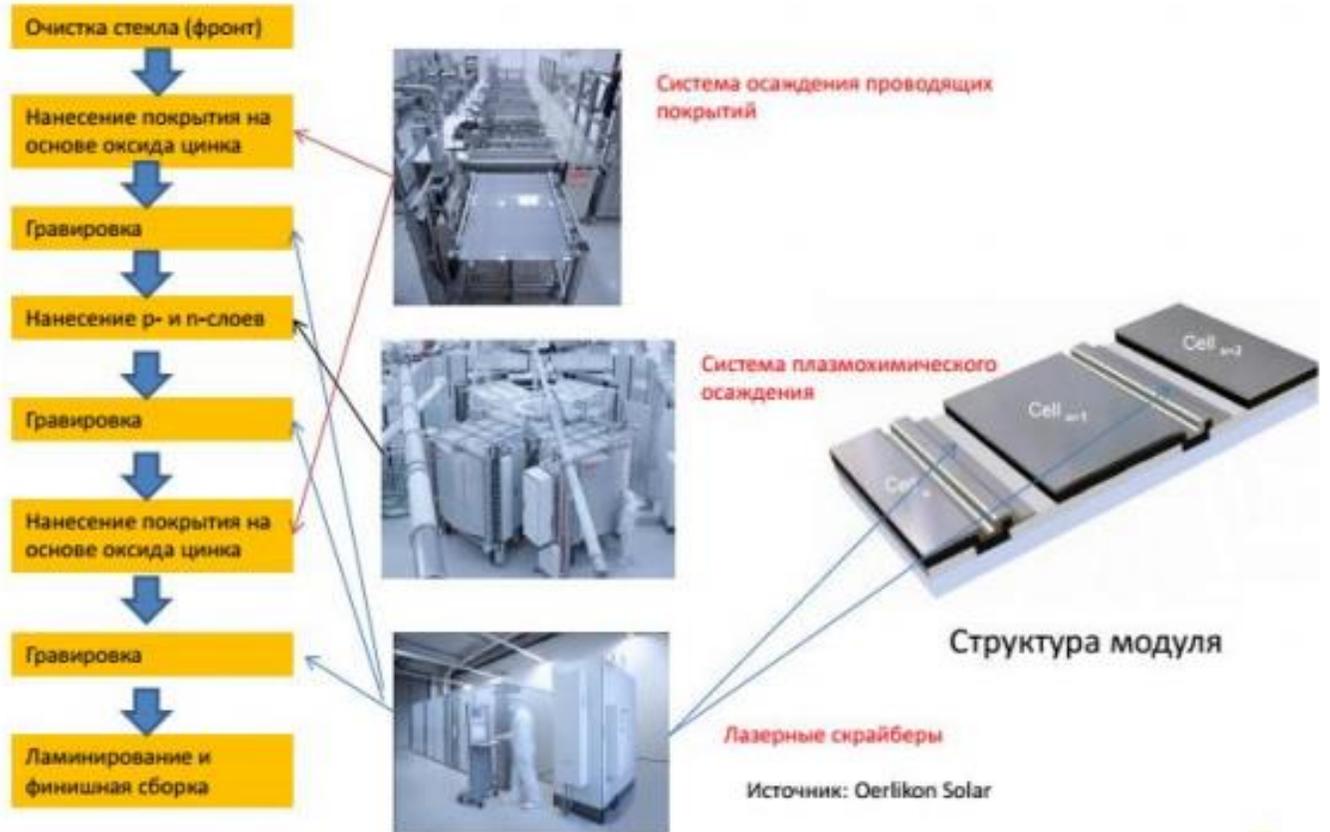
# Тонкопленочные кремниевые фотоэлектрические преобразователи



Absorption  $a\text{-Si:H}$       Absorption  $\mu\text{-Si:H}$



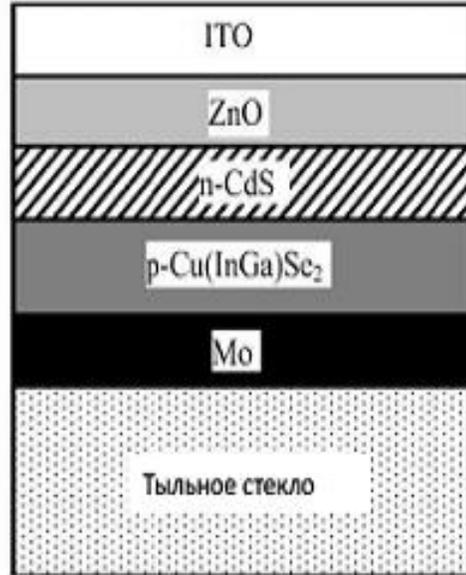
Сдвиг пиков поглощения фотонов расширяет диапазон поглощаемых длин волн для гидрогенизированных пленок аморфного и микрокристаллического кремния  
В чисто аморфных пленках (5-7%) наблюдается высокая скорость деградации характеристик, особенно в первые 2-3 тыс. часов эксплуатации. Важная особенность – сразу формируется фотоэлектрический модуль, а не отдельные ФЭПы





# Тонкопленочные некремниевые фотоэлектрические преобразователи – CIS, CIGS

Структура ФЭП



В случае формирования ФЭП на металлической фольге подслоем молибдена не используется  
 Thin-Film Solar Cells: An Overview, K. L. Chopra<sup>1</sup>, P. D. Paulson<sup>2\*</sup>, y and V. Dutta,  
 PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS  
 Prog. Photovolt: Res. Appl. 2004; 12:69–92 (DOI: 10.1002/ppp.541)

Основные проблемы – использование, кадмия (токсичный элемент) индия и галлия (редкие элементы). Перспектива – их замена на цинк и олово.

## Упрощенная технологическая схема производства тонкопленочных модулей Stion | TSMC



### Компания Nanosolar (США):

- Жидкофазное осаждение (струйная печать) обоих полупроводниковых слоев на алюминиевую фольгу (отсутствие молибденового подслоя);
- Использование слоя ITO
- Введение селена в процессе формирования чернил
- Сборка безрамочного модуля из отдельных ФЭП на фольге

Кпд модуля 9-10%

### Компания Stion (США):

- формирование p-слоя методом магнетронного напыления с последующим газофазным введением серы и селена;
- Использование слоя оксида цинка
- Рамочный полноразмерный модуль формируется сразу на стекле с использованием промежуточного подслоя Mo | SiO<sub>2</sub>

Кпд модуля 12-13%

На лабораторном уровне достигнут кпд 20,4%



# Внешний вид стенда сравнительных испытаний



Угол наклона модулей  $70^\circ$



# Объекты испытаний

Модуль	Производитель	Пиковая мощность, Вт	Технология	Стоимость, руб. (2013)	Напряжение, В	
					OC	MPPT
CS5A 210MM	Canadian Solar	210	Mono-Si, MWT	12800	45,5	37,9
MLT265	Mitsubishi Electric	265	Mono-Si	21675	37,6	31
MSW180	Солнечный ветер	180	Mono-Si, bifacial	18000	44	37
GET AT2	Green Energy Technology (Applied Materials)	115	mc-Si a-Si	7500	130	90
TSMC 145 A	Taiwan Semiconductor Manufacturing Corporation	145	CIGS	13285	65	54
TSM 210 SB	Телеком-СТБ	210	Cz-Si, IBC	27000	44	38
TSM200 B	Телеком-СТБ	200	Multi-Si	12600	42	34

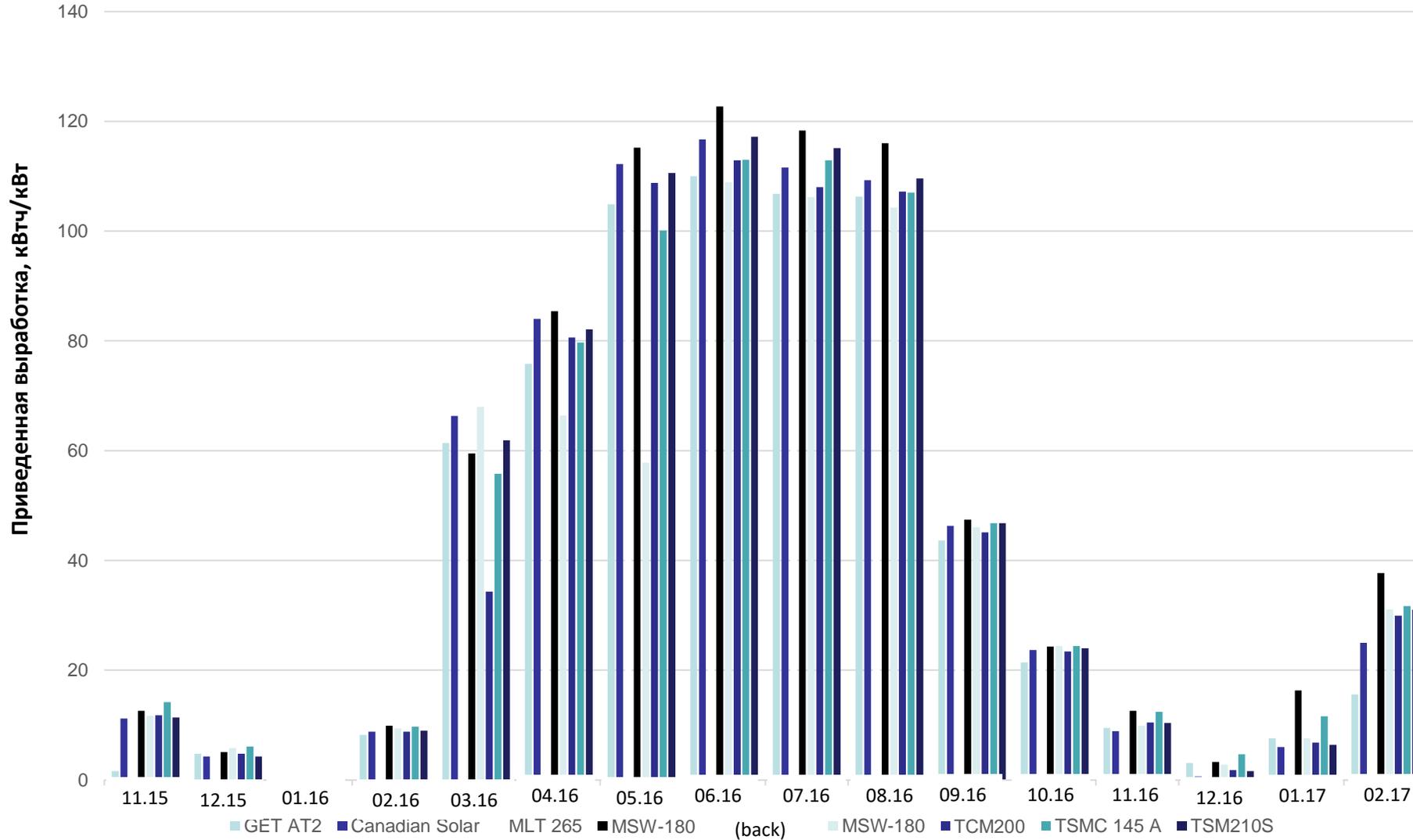
Использовались 2 модуля MSW180 were used – один с отражателем, второй с закрытой тыльной поверхностью

GET AT2 – тандемный аморфно-микрористаллический модуль, аналогичный модулям Хевел 1-го поколения.



# Годовая выработка энергии

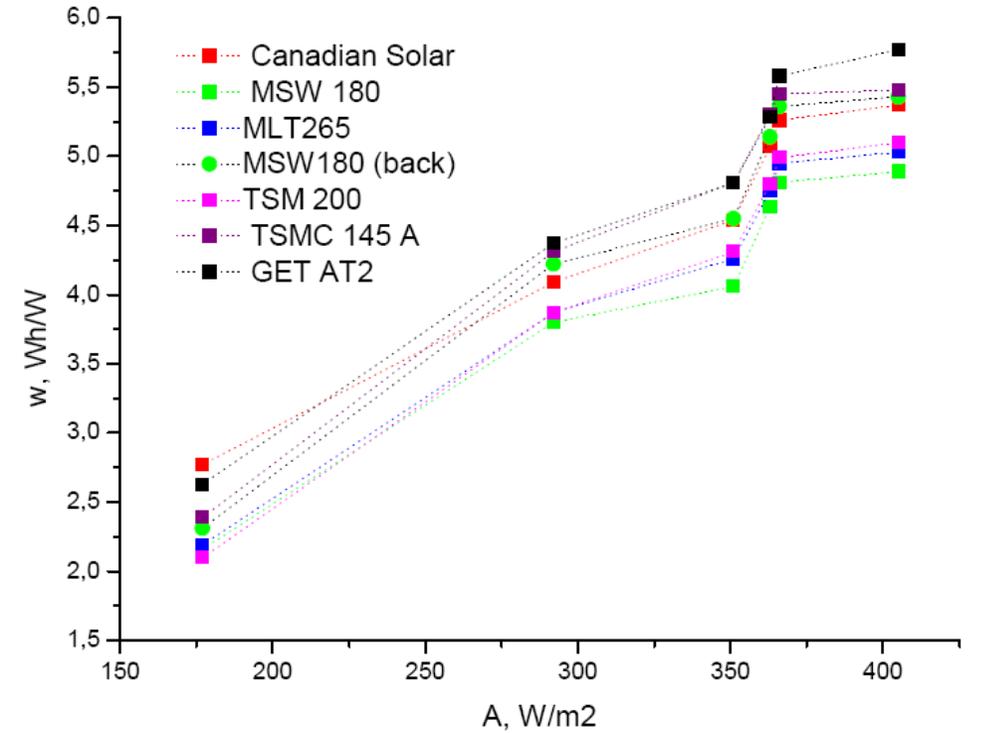
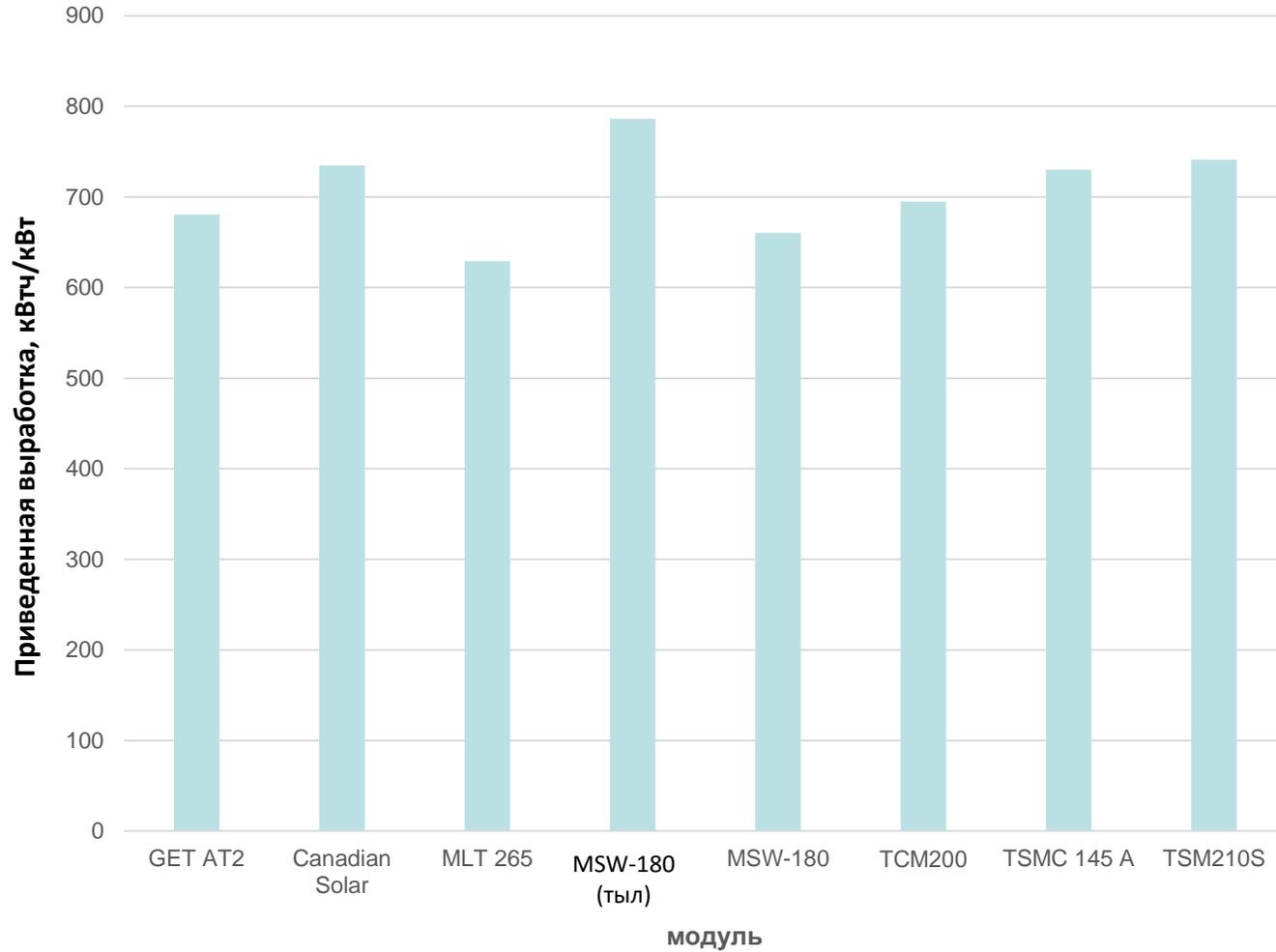
11.2015-02.2017





# Испытания двустороннего модуля

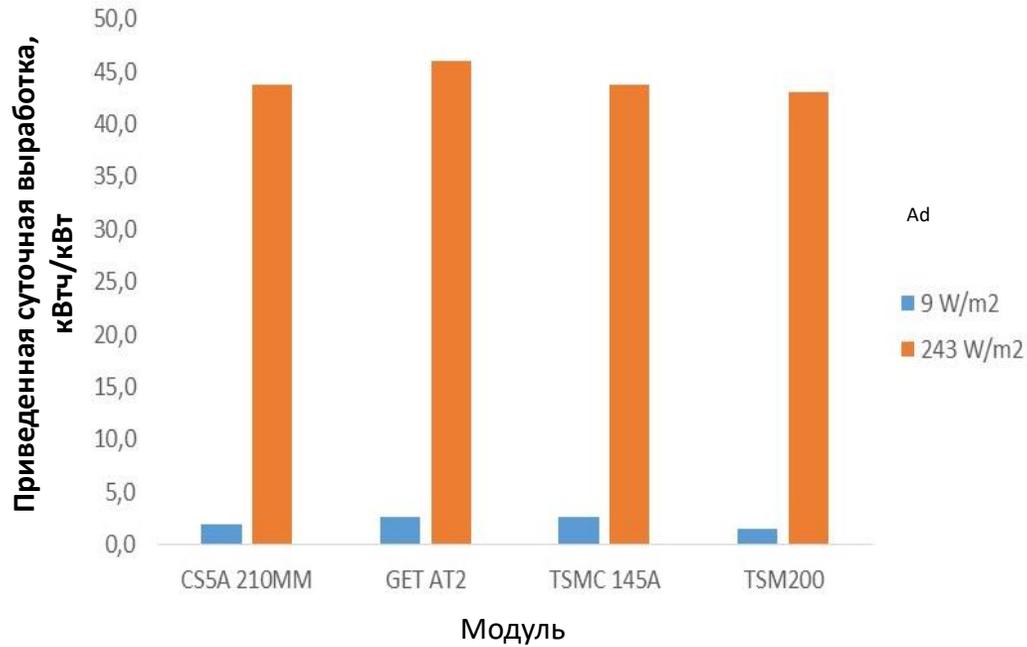
11.2015-02.2017



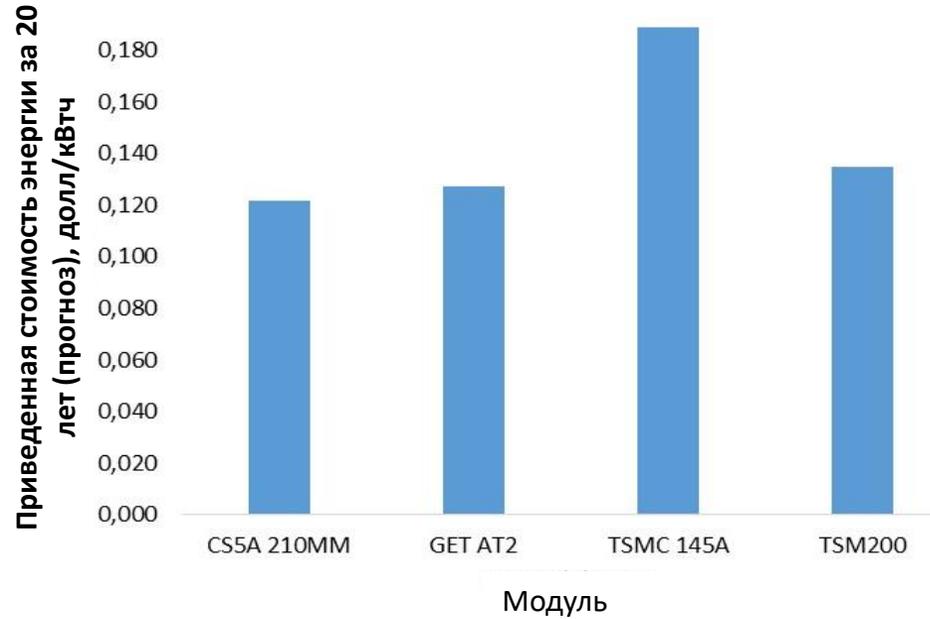
Зависимость приведенной выработки энергии от уровня инсоляции, 20.02. 2014 - 30.04.2014



# Сравнение кристаллических и тонкопленочных кремниевых модулей



Выработка энергии при различных уровнях солнечной радиации



Прогнозные оценки удельной стоимости произведенной энергии за 20 лет (на основе экспериментальных данных 2015-16 гг.)



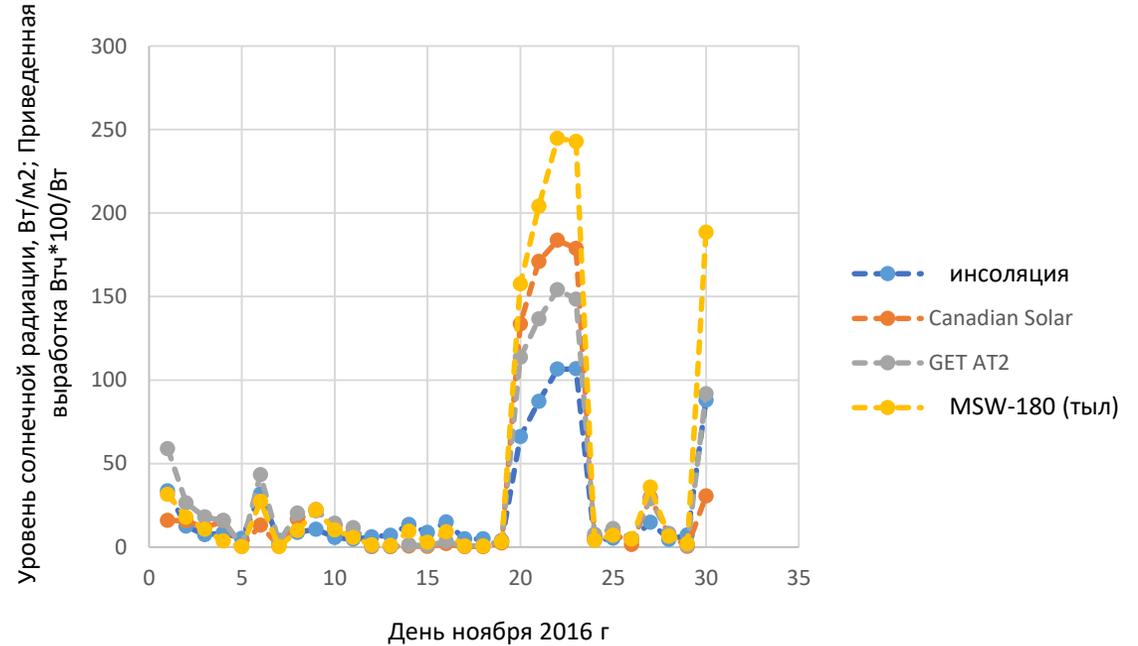
# Работа модулей в зимний период



GET AT2

Canadian Solar  
CS210M

MSW-180



- В рассматриваемых условиях характерным является формирование тонкого слоя льда на фронтальном стекле
- Обледенение и оснеживание начинаются с нижней рамки модуля, поэтому определенные преимущества имеют бескаркасные модули
- Двусторонние модули имеют преимущество за счет подсветки тыльной стороны
- При наличии прямой солнечной радиации ключевым параметром является величина тока, развиваемая солнечной батареей.



# Выводы

- Выполнены монтаж, пусконаладка и опытная эксплуатация стенда сравнительных испытаний фотоэлектрических модулей в условиях г. Москва. Получена информация по фактической работе 8 типов модулей.
- Современные тонкопленочные модули имеют определенные преимущества за счет меньшего температурного коэффициента мощности и меньших резистивных потерь. Дополнительными преимуществами a-Si | | mc-Si тандемных модулей является расширенная область поглощаемого излучения
- Рост КПД и снижение стоимости кристаллических кремниевых модулей существенно снизили разрыв в выработке относительно тонкопленочных по сравнению с данными 2006 г. Более высокие мощности этих модулей позволяют сократить площадь и стоимость станций.
- Активная тыльная сторона модуля увеличивает выработку на 15-20% при должном освещении. Это обстоятельство делает модуль на основе элементов р-типа 2006 г разработки конкурентоспособным по годовой выработке с современными модулями на основе элементов n-типа и пассивацией дефектов. Также для двусторонних модулей характерна меньшая потеря эффективности в зимний период, но все положительные эффекты существенно зависят от свойств подстилающей поверхности.
- Бескаркасные модули имеют ряд проблем с инсталляцией, но также лучше работают в зимний период.