



**ИнфоМайн** 

**исследовательская группа**

Объединение независимых экспертов в области минеральных ресурсов,  
металлургии и химической промышленности

---

# Обзор рынка солнечных фотоэле- ментов в России и СНГ

*Демонстрационная версия*

*Москва  
июль, 2008*

## Содержание

Введение.....	7
1. Принцип действия, основные типы, конструкция и направления применения солнечных фотоэлементов .....	9
2. Производство полупроводникового кремния для солнечных батарей в России и СНГ .....	16
3. Производство солнечных фотоэлементов за рубежом и в России. ....	22
3.1. Мировое производство солнечных фотоэлементов.....	22
3.2. Производство солнечных фотоэлементов в России и странах СНГ.....	27
3.3. Основные производители солнечных фотоэлементов в России и на Украине.....	29
4. Экспорт и импорт солнечных фотоэлементов в России и на Украине .....	35
4.1. Объем и тенденции российских экспортно-импортных поставок солнечных фотоэлементов.....	35
4.2. Анализ украинских экспортно-импортных поставок солнечных фотоэлементов .....	39
5. Прогноз мирового и российского рынка солнечных фотоэлементов.....	43
5.1 Перспективы мирового рынка солнечной энергетики .....	43
5.2 Перспективы рынка солнечной энергетики в России и на Украине .....	51
Заключение .....	57
Адресная книга основных производителей солнечных фотоэлементов в России и СНГ .....	64
Список основных источников.....	66

**Список таблиц**

Таблица 1. КПД солнечных батарей различных типов, %.....	12
Таблица 2. Основные преимущества солнечных батарей .....	14
Таблица 3. Национальные индексы инвестиционной привлекательности возобновляемой энергетики в странах мира в первом полугодии 2007 года (максимальный уровень 100) .....	23
Таблица 4. Основные предприятия-производители солнечных батарей в России и и номенклатура выпускаемой продукции .....	27
Таблица 5. Доля экспорта солнечных фотоэлементов в общем объеме их производства в России в 2003-2007 гг. ....	37
Таблица 6. Структура российского экспорта солнечных фотоэлементов по странам назначения в 2003–2007 гг., тыс. долл. США .....	38
Таблица 7. Структура российских экспортных поставок .....	39
Таблица 8. Ресурсы и потенциал различных видов нетрадиционных источников энергии в России в период до 2050 года, млн т угольного эквивалента .....	52
Таблица 9. Основные направления развития солнечной энергетики в России .....	53

## Список рисунков

Рисунок 1. Принцип действия солнечной батареи .....	11
Рисунок 2. Принципиальная схема производства кремниевых солнечных батарей.....	18
Рисунок 3. Динамика роста мировых объемов производства солнечных батарей по показателю суммарной мощности в 1995 – 2007 гг., МВт.....	24
Рисунок 4. Динамика использования мировых мощностей по производству солнечных батарей в 2003 – 2007 гг., МВт.....	24
Рисунок 5. Распределение производства солнечных батарей между основными мировыми производителями в 2007 году, % .....	25
Рисунок 6. Оценка объемов производства солнечных батарей в России по показателю суммарной мощности в 2003 – 2007 гг., МВт .....	29
Рисунок 7. Динамика экспортно-импортных поставок солнечных фотоэлементов в России в 2003-2007 гг., МВт .....	36
Рисунок 8. Динамика экспортно-импортных поставок солнечных фотоэлементов в России в 2003-2007 гг., тыс. долл. США .....	37
Рисунок 9. Динамика экспортно-импортных поставок солнечных фотоэлементов на Украине в 2003-2007 гг., МВт.....	41
Рисунок 10. Динамика экспортно-импортных поставок солнечных фотоэлементов на Украине в 2003-2007 гг., тыс. долл. США.....	42
Рисунок 11. Прогноз темпов роста населения в период до 2050 года, млрд чел. ....	43
Рисунок 12. Прогноз потребления энергоносителей в период до 2050 года, т уг. экв.....	44
Рисунок 13. Прогноз распределения выбросов CO <sub>2</sub> в период до 2050 гг., % .....	45
Рисунок 14. Прогноз развития производственных мощностей в мировой солнечной энергетике на период до 2015 г, МВт.....	46
Рисунок 15. Прогноз производства солнечных батарей в странах мира в период до 2015 г., %.....	47
Рисунок 16. Прогноз развития производства солнечных батарей в России на период до 2015 г, МВт .....	55

## Аннотация

Настоящий отчет посвящен исследованию российского рынка солнечных фотоэлементов и модулей наземного применения. Отчет состоит из введения, 5 глав и заключения, содержит 66 страниц, в том числе 9 таблиц, 16 рисунков и 2 приложения. Данная работа является кабинетным исследованием. В качестве источников использовались данные Федеральной службы государственной статистики РФ, Федеральной таможенной службы РФ, Украинского ГТС и ГКС, научно-технической литературы, отраслевой, региональной и международной прессы, а также интернет-сайтов предприятий-производителей солнечных фотоэлементов.

В первой главе изложены основные принципы работы солнечных фотоэлементов, приведены основные их типы. В данной главе описаны также основные направления применения солнечных фотоэлементов, рассмотрены их недостатки и преимущества.

Вторая глава отчета описывает производство полупроводникового кремния для солнечных батарей. В данном разделе приведено описание современного состояния производителей полупроводникового кремния «солнечного» качества, а также дается краткое описание технологии производства «солнечного» кремния.

В третьей главе описано мировое производство солнечных батарей, приведены объемы производства данного вида продукции за последние 10 лет, а также приведены крупнейшие производители солнечных фотоэлементов в мире и страны с наибольшим уровнем развития солнечной энергетики. Во второй части данной главы проведено исследование производства солнечных батарей в России и СНГ, описаны текущие основные предприятия-производители солнечных фотоэлементов, приведены номенклатура выпускаемой ими продукции, проведен анализ динамики объемов производства солнечных батарей за последние 5 лет.

Четвертая глава отчета посвящена внешнеторговым операциям российского и украинского рынка солнечных фотоэлементов и модулей. В настоящей главе дан анализ динамики российских и украинских экспортно-импортных поставок данного вида продукции за последние 5 лет в денежном исчислении и по показателю суммарной мощности, подробно описаны направления поставок, приведены данные о структуре внешнеторговых операций с солнечными фотоэлементами и модулями в России и на Украине.

Пятая глава посвящена оценке тенденций развития и перспектив мирового и российского рынка солнечной энергетики в период до 2015 года. В данной главе приведены прогнозы ведущих специалистов в области Альтернативной энергетики по развитию данной отрасли.

В приложениях к отчету приводятся контактные данные крупнейших российских производителей солнечных фотоэлементов в России и на Украине, а также список использованных источников.

## Введение

Быстрый рост энергопотребления является одной из наиболее характерных особенностей технической деятельности человечества во второй половине XX века. Увеличение производства энергии происходило в основном за счет увеличения добычи нефти и газа, наиболее удобных для производства электроэнергии. Однако энергетика оказалась первой крупной отраслью мировой экономики, которая столкнулась с ситуацией истощения своей традиционной сырьевой базы. В начале 70-х годов энергетический кризис разразился во многих странах. Одной из причин этого кризиса явилась ограниченность ископаемых энергетических ресурсов. Кроме того, нефть, газ и уголь являются также ценнейшим сырьем для интенсивно развивающейся химической промышленности. Поэтому сейчас все труднее сохранить высокий темп развития энергетики путем использования лишь традиционных ископаемых источников энергии.

Загрязнение окружающей среды продуктами сгорания ископаемых источников, в первую очередь угля, является причиной ухудшения экологической обстановки на Земле. Существенным является также и «тепловое загрязнение» планеты, происходящее при сжигании любого вида топлива. Допустимый верхний предел выработки энергии на Земле, по оценкам ряда ученых, всего на два порядка выше нынешнего среднего мирового уровня. Такой рост энергопотребления может привести к увеличению температуры на поверхности Земли примерно на один градус. Нарушение энергоданса планеты в таких масштабах может дать необратимые опасные изменения климата. Эти обстоятельства определяют возрастающую роль возобновляемых источников энергии, широкое использование которых не приведет к нарушению экологического баланса Земли.

Большинство возобновляемых видов энергии – гидроэнергия, механическая и тепловая энергия мирового океана, ветровая и геотермальная энергия – характеризуется либо ограниченным потенциалом, либо значительными трудностями широкого использования. Суммарный потенциал большинства возобновляемых источников энергии позволит увеличить потребление энергии с нынешнего уровня всего лишь на порядок. Но существует еще один источник энергии – Солнце.

Солнце, звезда спектрального класса 2, желтый карлик, средняя звезда по всем своим основным параметрам: массе, радиусу, температуре и абсолютной величине. Из общей мощности излучения Солнца, величина порядка  $4 \cdot 10^{23}$  кВт, на Землю поступает  $1,7 \cdot 10^{14}$  кВт, или около  $4 \cdot 10^{21}$  кДж в год. С точки зрения уже разработанных технологий можно в принципе утилизировать до 1,5% этой энергии, что в десятки раз превосходит достигнутый ныне уровень мирового энергопотребления. Интенсивность солнечного света на уровне моря в южных широтах, когда Солнце в зените, составляет  $1 \text{ кВт/м}^2$ .

При разработке высокоэффективных методов преобразования солнечной энергии Солнце может обеспечить бурно растущие потребности в энергии в течение многих сотен лет.

Главными направлениями работ в области преобразования солнечной энергии в настоящее время являются:

- прямой тепловой нагрев (получение тепловой энергии) и термодинамическое преобразование (получение электрической энергии с промежуточным преобразованием солнечной энергии в тепловую);
- фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии в электрическую с помощью солнечных фотоэлементов (солнечных батарей).

Успехи последних лет в технологии фотопреобразования и положительный практический опыт использования фотоэлектрических систем стали основой быстрого развития фотоэнергетики в мире. Мировой рынок фотоэлектричества уже в прошлом году перешел тысячемегаваттный рубеж. По разным оценкам, если стоимость полученной фотоэлектрическим методом электроэнергии снизится до 10 центов за 1 кВт-ч, фотоэнергетика может стать серьезной альтернативой любым другим методам производства электроэнергии, в том числе из-за абсолютной экологической чистоты и безопасности и чрезвычайной простоты в обслуживании. При этом фотопреобразователям на основе кристаллического кремния отводится ключевая, основополагающая роль.

Бытует мнение, что солнечные ресурсы России очень малы и не позволяют эффективно использовать фотоэлектрические установки. Но несмотря на то, что самые южные районы России расположены севернее 42-ой параллели, даже в средней полосе России солнечной энергии достаточно для круглогодичной работы солнечной электростанции. Однако в настоящее время Россия и страны бывшего СНГ далеко отстали от мирового уровня производства и использования солнечных фотоэлементов – сегодня доля российских изделий для производства фотоэлектричества на мировом рынке не достигает и 1%. При этом емкость российского рынка фотоэлектричества оценивается миллиардами ватт. Но технический прогресс, достигнутый в этой области за последнее десятилетие в России так велик, что специалисты дают весьма оптимистические прогнозы. Следует учесть также, что уже к середине XXI века солнечная энергетика наряду с другими возобновляемыми источниками (геотермальные и приливные станции, ветровые турбины и др.) может занять ведущее положение в мире.

## 1. Принцип действия, основные типы, конструкция и направления применения солнечных фотоэлементов

Важный вклад в понимание механизма действия фотоэффекта в полупроводниках внес основатель Физико-технического института (ФТИ) Российской Академии наук академик А.Ф. Иоффе. Он мечтал о применении полупроводниковых фотоэлементов в солнечной энергетике уже в тридцатые годы, когда Б.Т. Коломиец и Ю.П. Маслаковец создали в ФТИ сернисто-таллиевые фотоэлементы с рекордным для того времени КПД = 1%.

Широкое практическое использование для энергетических целей солнечных батарей началось с запуском в 1958 году искусственных спутников Земли - советского «Спутник»-3 и американского «Авангард»-1. С этого времени вот уже более 35 лет полупроводниковые солнечные батареи являются основным и почти единственным источником энергоснабжения космических аппаратов и больших орбитальных станций типа «Салют» и «Мир». Большой задел, наработанный учеными в области солнечных батарей космического назначения, позволил развернуть также работы по наземной фотоэлектрической энергетике.

Основу фотоэлементов составляет полупроводниковая структура с р-п переходом, возникающим на границе двух полупроводников с различными механизмами проводимости. Эта терминология берет начало от английских слов positive (положительный) и negative (отрицательный). Получают различные типы проводимости путем изменения типа введенных в полупроводник примесей. Контакт р- или п-полупроводников приводит к образованию между ними контактного электрического поля, играющего чрезвычайно важную роль в работе солнечного фотоэлемента. При соединении в одном монокристалле полупроводников р- и п-типа возникает диффузионный поток электронов из полупроводника п-типа в полупроводник р-типа и, наоборот, поток дырок из р- в п-полупроводник. В результате такого процесса прилегающая к р-п переходу часть полупроводника р-типа будет заряжаться отрицательно, а прилегающая к р-п переходу часть полупроводника п-типа, наоборот, приобретет положительный заряд. Таким образом, вблизи р-п перехода образуется двойной заряженный слой, который противодействует процессу диффузии электронов и дырок. Действительно, диффузия стремится создать поток электронов из п-области в р-область, а поле заряженного слоя, наоборот, вернуть электроны в п-область. Аналогичным образом поле в р-п переходе противодействует диффузии дырок из р- в п-область. В результате двух процессов, действующих в противоположные стороны (диффузии и движения носителей тока в электрическом поле), устанавливается стационарное, равновесное состояние: на границе возникает заряженный слой, препятствующий проникновению электронов из п-полупроводника, а дырок из р-полупроводника. Другими словами, в области р-п перехода возникает энергетический (потенциальный) барьер, для преодоления которого электроны из

p-полупроводника и дырки из p-полупроводника должны затратить определенную энергию.

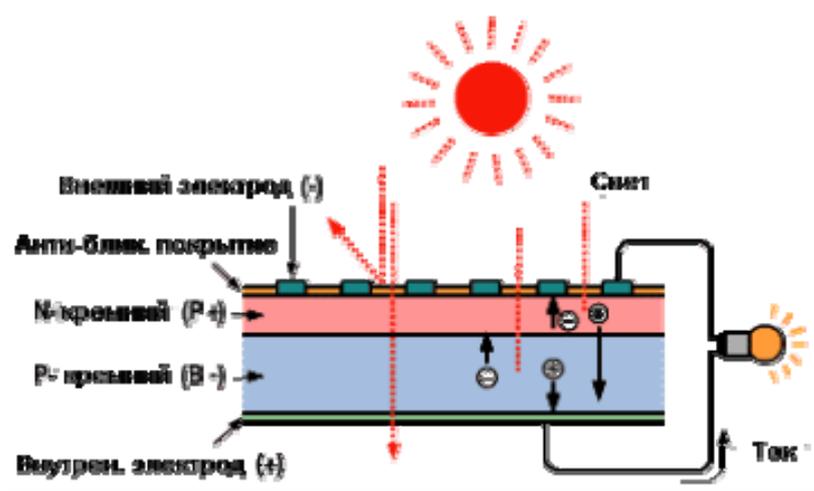
При поглощении света в полупроводнике возбуждаются электронно-дырочные пары. В однородном полупроводнике фотовозбуждение увеличивает только энергию электронов и дырок, не разделяя их в пространстве, то есть электроны и дырки разделяются в «пространстве энергий», но остаются рядом в геометрическом пространстве. Для разделения носителей тока и появления фотоэлектродвижущей силы (фотоЭДС) должна существовать дополнительная сила. Наиболее эффективное разделение неравновесных носителей имеет место именно в области p-n перехода. Генерированные вблизи p-n перехода «неосновные» носители (дырки в n-полупроводнике и электроны в p-полупроводнике) диффундируют к p-n переходу, подхватываются полем p-n перехода и выбрасываются в полупроводник, в котором они становятся основными носителями: электроны будут локализоваться в полупроводнике n-типа, а дырки - в полупроводнике p-типа. В результате полупроводник p-типа получает избыточный положительный заряд, а полупроводник n-типа – отрицательный. Между n- и p-областями фотоэлемента возникает разность потенциалов - фотоЭДС. Полярность фотоЭДС соответствует «прямому» смещению p-n перехода, которое понижает высоту барьера и способствует инжекции дырок из p-области в n-область и электронов из n-области в p-область. В результате действия этих двух противоположных механизмов - накопления носителей тока под действием света и их оттока из-за понижения высоты потенциального барьера - при разной интенсивности света устанавливается разная величина фотоЭДС. При этом величина фотоЭДС в широком диапазоне освещенностей растет пропорционально логарифму интенсивности света. При очень большой интенсивности света, когда потенциальный барьер оказывается практически нулевым, величина фотоЭДС выходит на «насыщение» и становится равной высоте барьера на неосвещенном p-n переходе. При засветке же прямым, а также сконцентрированным до 100 - 1000 крат солнечным излучением, величина фотоЭДС составляет 50 - 85% от величины контактной разности потенциала p-n перехода.

При коротком замыкании освещенного p-n перехода в электрической цепи потечет ток, пропорциональный по величине интенсивности освещения и количеству генерированных светом электронно-дырочных пар. При включении в электрическую цепь полезной нагрузки, например питаемого солнечной батареей калькулятора, величина тока в цепи несколько уменьшится. Обычно электрическое сопротивление полезной нагрузки в цепи солнечного элемента выбирают таким, чтобы получить максимальную отдаваемую этой нагрузке электрическую мощность.

Солнечный фотоэлемент изготавливается на основе пластины, выполненной из полупроводникового материала, например кремния (рис. 1). В пластине создаются области с p- и n- типами проводимости. В качестве методов создания этих областей используется, например, метод диффузии примесей или метод наращивания одного полупроводника на

другой. Затем изготавливаются нижний и верхний электроды, причем, как правило, нижний контакт – сплошной, а верхний выполняется в виде гребенчатой структуры (тонкие полосы, соединенные относительно широкой токосборной шиной). Каждая солнечная батарея состоит из 36, 72 или 96 отдельных солнечных элементов. На практике элементы соединяются в батареи, чтобы суммарное напряжение было достаточное – не 0,6 В (стандартное напряжение, вырабатываемое одним элементом), а требуемого уровня. Промышленные батареи собираются из отдельных элементов, которые соединяются проводами, после чего размещаются между защитными стеклянными пластинами и полимерными плёнками. Тонкопленочные элементы можно купить уже в готовых массивах, иногда даже в готовых механизированных корпусах, обеспечивающих автоматическое позиционирование батареи.

**Рисунок 1. Принцип действия солнечной батареи**



*Источник: анализ научно-технической литературы*

Основным материалом для получения солнечных элементов является кремний. Кремний, по-видимому, вообще один из самых изученных материалов в природе, к тому же второй по распространенности после кислорода. Если учесть, что первые солнечные элементы были изготовлены из кремния около сорока лет назад, то естественно, что этот материал играет первую скрипку в программах фотоэлектрической солнечной энергетики. Фотоэлементы из монокристаллического кремния сочетают достоинства использования относительно дешевого полупроводникового материала с высокими параметрами получаемых на его основе приборов.

Сейчас около 93,5% производимых в мире солнечных фотоэлементов изготавливается на основе моно- и поликристаллического толстопленочного кремния, из них 38,3% - на основе монокристаллического кремния, 55,2% - на основе поли- или мульткристаллического кремния. При этом 90,6% фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) производится в виде пластин мо-

но- и мультикристаллического кремния и 2,9% - в виде микрокристаллических кремниевых лент.

Оставшаяся часть ФЭП, производимых в виде тонких пленок таких материалов, как аморфный кремний, теллурид кадмия (CdTe), диселенид меди и индия (CIS), арсенид-галлия (GaAs) и других, нанесенных на различные подложки.

Коэффициент полезного действия фотоэлементов рассчитывается как процентное соотношение между энергией, поступившей на фотоэлемент и электроэнергией, поступившей к потребителю. КПД солнечных батарей невелик, он не превышает пока 25%, за исключением малораспространенных и дорогих арсенид-галлиевых батарей (табл. 1). Это значит, что с 1 м<sup>2</sup> современных солнечных батарей снимается, мощность около 100-130 Вт. Правда, есть возможности увеличения КПД солнечных батарей за счет совершенствования их конструкции и улучшения качества полупроводникового слоя. Предлагается, например, накладывать две или несколько батарей одну на другую так, чтобы нижняя поверхность использовала ту часть спектра солнечной энергии, которую пропускает, не поглощая, верхний слой.

**Таблица 1. КПД солнечных батарей различных типов, %**

Материал солнечной батареи	КПД, %
Толстопленочные солнечные батареи	
Монокристаллический кремний	25
Поликристаллический кремний	20
Тонкопленочные солнечные батареи	
Арсенид галлия	35-40
Диселенид меди и индия	20
Теллурид кадмия	16
Аморфный кремний	10
Нанокристаллический кремний	8-10
Полимерный кремний	5

*Источник: анализ научно-технической литературы*

Наиболее распространённые солнечные элементы изготавливались из толстоплёночного кремния, чей КПД составляет до 20 процентов для поликристаллических элементов и до 25 процентов для монокристаллических.

За относительно короткую историю выработки солнечной энергии было разработано много разных типов ячеек, которые влияют на конструкцию батарей и на эффективность преобразования солнечной энергии в электричество.

Для промышленного и домашнего использования чаще всего применяются ячейки из поликристаллического или монокристаллического кремния. У поликристаллического кремния меньше КПД, но и стоят они дешевле.

Изготавливать солнечные батареи из аморфного кремния неэффективно – слишком низкий КПД. Тонкоплёночные технологии сегодня составляют всего 2% рынка. Но солнечные батареи на упомянутых технологиях дают существенные преимущества по сравнению с кристаллическим кремнием. Первое и главное – они примерно в 100 раз тоньше, чем кристаллические батареи, то есть и упаковку можно делать тоньше. Кроме того, тонкоплёночные солнечные батареи могут принимать рассеянный и слабый солнечный свет (когда солнце, скажем, скрыто за облаками) намного более эффективно, чем кристаллические батареи.

Тонкоплёночные батареи намного терпимее относятся к затенению. Ещё одно преимущество касается лучшей терпимости к высоким рабочим температурам, которые характерны для работы под ярким солнцем. Максимальная рабочая температура тонкоплёночных солнечных батарей достигает  $+150^{\circ}\text{C}$ , в отличие от  $+70^{\circ}\text{C}$  у кремниевых батарей. Но у тонкоплёночных батарей есть и свои недостатки: чтобы получить такой же уровень энергии, как у толстоплёночных батарей, требуется большая площадь поверхности.

Главное применение солнечные батареи нашли в космонавтике, где они занимают доминирующее положение среди других источников автономного энергопитания. Солнечные батареи снабжают электроэнергией аппаратуру спутников и системы жизнеобеспечения космических кораблей и станций, а также заряжают электрохимические аккумуляторы, используемые на теневых участках орбиты.

В земных условиях солнечные фотоэлементы используют для питания устройств автоматики, переносных радиостанций и радиоприёмников, для катодной антикоррозионной защиты нефте- и газопроводов. В России, США и Японии работают маяки и навигационные указатели с энергоснабжением от солнечных батарей и автоматически подзаряжаемых ими буферных аккумуляторов. Идеальным местом применения солнечных батарей являются также катера и яхты, ведь даже в случае отказа других источников питания, всегда можно «питать» спутниковый телефон, GPS-навигацию, иметь бортовое освещение и т.д.

В космических условиях солнечные батареи используются в России более 50 лет. Накопленный за эти годы опыт эксплуатации показывает бесспорные преимущества солнечных фотоэлементов по сравнению с другими источниками энергии (табл. 2).

**Таблица 2. Основные преимущества солнечных батарей**

<b>Преимущества солнечных фотоэлементов</b>	<b>Чем обусловлены</b>
Высокая надежность	Фотоэлементы разрабатывались для использования в космосе, где ремонт слишком дорог, либо вообще невозможен. До сих пор фотоэлементы являются источником питания практически для всех спутников на земной орбите, потому что они работают без поломок и практически не требуют технического обслуживания.
Низкие текущие расходы	Фотоэлементы работают на бесплатном топливе – солнечной энергии. Благодаря отсутствию движущихся частей, они не требуют особого ухода. Рентабельные фотоэлектрические системы являются идеальным источником электроэнергии для станций связи в горах, навигационных бакенов в море и других потребителей, расположенных вдали от линий электропередач.
Экологичность	Поскольку при использовании фотоэлектрических систем не сжигается топливо и не имеется движущихся частей, они являются бесшумными и экологически чистыми. Эта их особенность чрезвычайно полезна там, где единственной альтернативой для получения света и электропитания являются дизель-генераторы и керосиновые лампы.
Модульность	Фотоэлектрическую систему можно довести до любого размера. Владелец такой системы может увеличить либо уменьшить ее, если изменится его потребность в электроэнергии. По мере возрастания энергопотребления и финансовых возможностей, домовладелец может каждые несколько лет добавлять новые модули.
Низкие затраты на строительство систем	Размещают фотоэлектрические системы обычно близко к потребителю, а значит, линии электропередачи не нужно тянуть на дальние расстояния. Вдобавок, не нужен понижающий трансформатор. Меньше проводов означает низкие затраты и более короткий период установки.

*Источник: анализ научно-технической литературы*

Наряду с множеством безусловных преимуществ солнечных батарей по сравнению с другими источниками энергии можно выделить для объективности и их недостатки:

- самый существенный недостаток солнечных фотоэлементов – их высокая стоимость, вызванная высокой стоимостью полупроводникового кремния – основного элемента солнечных панелей. В настоящее время фотовольтаика является наиболее дорогостоящей технологией получения электроэнергии. Однако стоимость солнечного электричества снижается наиболее стремительными темпами из всех видов генерации энергии из возобновляемых источников;

- пока ещё недостаточная готовность отечественных потребителей электроэнергии к применению солнечных батарей, связанная с отсутствием информации, нормативной документации и подготовленного персонала.