

PHOTOELECTRIC  
TRANSFORMATION  
OF SOLAR ENERGY

V. M. ANDREEV

*The recent results of the studies of photoelectric methods of transformation of solar energy are discussed. These results help to understand how solar cells work, what are the methods of increasing their efficiency, the ways of reducing the cost of solar energy, and photoelectric conversion of concentrated sunlight. The estimation of further progress in this advanced branch of alternative energies is given.*

**В статье рассматриваются различные аспекты исследований, разработок и применения фотоэлектрического метода преобразования солнечной энергии: результаты исследований солнечных элементов, пути повышения их эффективности, снижения стоимости "солнечной" электроэнергии, фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Дается оценка развития этого перспективного направления альтернативной энергетики.**

© Андреев В.М., 1996

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

В. М. АНДРЕЕВ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

### ВВЕДЕНИЕ

Быстрый рост энергопотребления является одной из наиболее характерных особенностей технической деятельности человечества во второй половине XX века. Развитие энергетики до недавнего времени не встречало принципиальных трудностей. Увеличение производства энергии происходило в основном за счет увеличения добычи нефти и газа, наиболее удобных в потреблении. 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.

Атомная энергетика в последнее время также столкнулась со значительными трудностями, связанными, в первую очередь, с необходимостью резкого увеличения затрат на обеспечение безопасности работы атомных электростанций.

Загрязнение окружающей среды продуктами сгорания ископаемых источников, в первую очередь угля и ядерного топлива, 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 энергобаланса 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.

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПУТЬ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

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, очень средняя звезда по всем своим основным параметрам: массе, радиусу, температуре и абсолютной величине. Но эта звезда имеет одну уникальную особенность – это “наша звезда”, и человечество обязано всем своим существованием этой средней звезде. Наше светило поставляет Земле мощность около  $10^{17}$  Вт – такова сила “солнечного зайчика” диаметром 12,7 тыс. км, который постоянно освещает обращенную к Солнцу сторону нашей планеты. Интенсивность солнечного света на уровне моря в южных широтах, когда Солнце в зените, составляет 1 кВт/м<sup>2</sup>. При разработке высокоеффективных методов преобразования солнечной энергии Солнце может обеспечить бурно растущие потребности в энергии в течение многих сотен лет.

Доводы противников крупномасштабного использования солнечной энергии сводятся в основном к следующим аргументам:

1. Удельная мощность солнечной радиации мала, и крупномасштабное преобразование солнечной энергии потребует очень больших площадей.

2. Преобразование солнечной энергии очень дорого и требует практически нереальных материальных и трудовых затрат.

Действительно, как велика будет площадь Земли, покрытой преобразовательными системами, для производства заметной в мировом энергетическом бюджете доли электроэнергии? Очевидно, что эта площадь зависит от эффективности используемых преобразовательных систем. Для оценки эффективности фотоэлектрических преобразователей, осуществляющих прямое преобразование солнечной энергии в электрическую с помощью полупроводниковых фотоэлементов, введем понятие коэффициента полезного действия (КПД) фотоэлемента, определяемого как отношение мощности электроэнергии, вырабатываемой данным элементом, к мощности падающего на поверхность фотоэлемента солнечного зайчика. Так, при КПД солнечных преобразователей, равном 10% (типичные значения КПД для кремниевых фотоэлементов, широко освоенных в серийном промышленном производстве для нужд наземной энергетики), для производства  $10^{12}$  Вт электроэнергии потребовалось бы покрыть

фотопреобразователями площадь  $4 \cdot 10^{10}$  м<sup>2</sup>, равную квадрату со стороной 200 км. При этом интенсивность солнечной радиации принята равной 250 Вт/м<sup>2</sup>, что соответствует типичному среднему значению в течение года для южных широт. То есть “низкая плотность” солнечной радиации не является препятствием для развития крупномасштабной солнечной энергетики. Возможные пути создания экономичных преобразователей солнечной энергии будут рассмотрены в следующих разделах настоящей статьи.

Приведенные выше соображения являются достаточно веским аргументом: проблему преобразования солнечной энергии необходимо решать сегодня, чтобы использовать эту энергию завтра. Можно хотя бы в шутку рассматривать эту проблему в рамках решения энергетических задач по управляемому термоядерному синтезу, когда эффективный реактор (Солнце) создан самой природой и обеспечивает ресурс надежной и безопасной работы на многие миллионы лет, а наша задача заключается лишь в разработке наземной преобразовательной подстанции. В последнее время в мире проведены широкие исследования в области солнечной энергетики, которые показали, что уже в ближайшее время этот метод получения энергии может стать экономически оправданным и найти широкое применение.

Россия богата природными ресурсами. Мы имеем значительные запасы ископаемого топлива – угля, нефти, газа. Однако использование солнечной энергии имеет и для нашей страны большое значение. Несмотря на то, что значительная часть территории России лежит в высоких широтах, некоторые весьма большие южные районы нашей страны по своему климату очень благоприятны для широкого использования солнечной энергии.

Еще большие перспективы имеет использование солнечной энергии в странах экваториального пояса Земли и близких к этому поясу районах, характеризуемых высоким уровнем поступления солнечной энергии. Так, в ряде районов Центральной Азии продолжительность прямого солнечного облучения достигает 3000 часов в год, а годовой приход солнечной энергии на горизонтальную поверхность составляет  $1500 - 1850$  кВт · час/м<sup>2</sup>.

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);

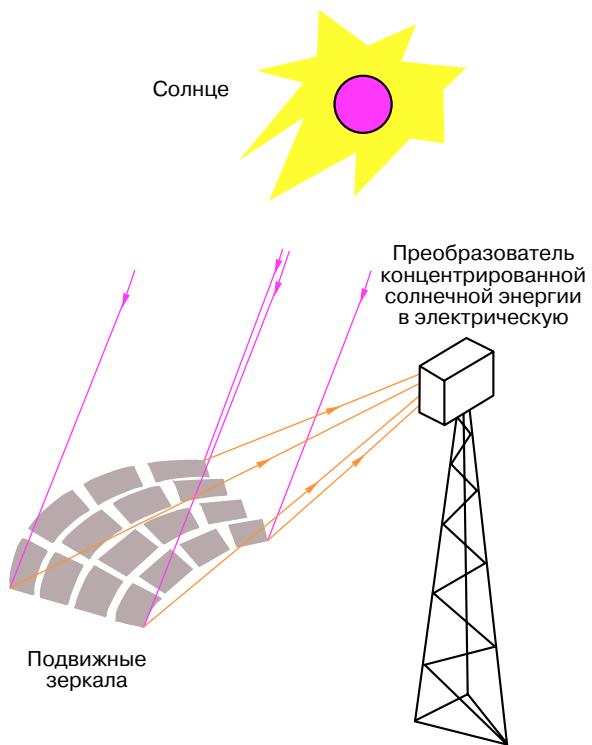
– фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии.

Прямой тепловой нагрев является наиболее простым методом преобразования солнечной энергии и широко используется в южных районах России и в странах экваториального пояса в установках

солнечного отопления, снабжения горячей водой, охлаждения зданий, оросения воды и т.п. Основой солнечных теплоиспользующих установок являются плоские солнечные коллекторы – поглотители солнечного излучения. Вода или другая жидкость, находясь в контакте с поглотителем, нагревается и при помощи насоса или естественной циркуляции отводится от него. Затем нагретая жидкость поступает в хранилище, откуда ее потребляют по мере необходимости. Подобное устройство напоминает системы бытового горячего водоснабжения.

Электроэнергия является наиболее удобным для использования и передачи видом энергии. Поэтому понятен интерес исследователей к разработке и созданию солнечных электростанций, использующих промежуточное преобразование солнечной энергии в тепло с последующим его преобразованием в электроэнергию.

В мире сейчас наиболее распространены солнечные тепловые электростанции двух типов: 1) башенного типа (рис. 1) с концентрацией солнечной энергии на одном гелиоприемнике, осуществляющей с помощью большого количества плоских зеркал; 2) рассредоточенные системы из параболоидов и параболоцилиндров, в фокусе которых размещены тепловые приемники и преобразователи малой мощности.



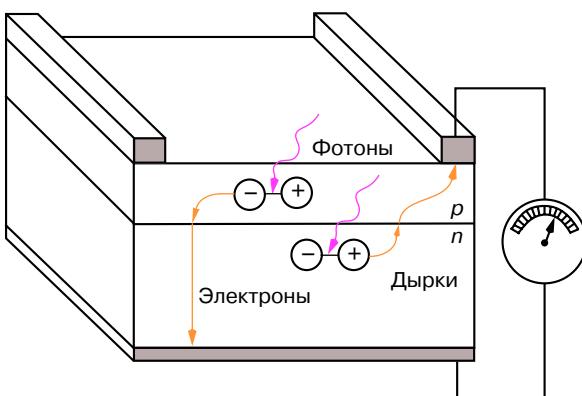
**Рис. 1.** Солнечная энергетическая установка “башенного” типа.

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

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 *p-n* переходом (рис. 2), возникающим на границе двух полупроводников с различными механизмами проводимости. Заметим, что эта терминология берет начало от английских слов *positive* (положительный) и *negative* (отрицательный). Получают различные типы проводимости путем изменения типа введенных в полупроводник примесей. Так, например, атомы III группы Периодической системы Д.И. Менделеева, введенные в кристаллическую решетку кремния, придают последнему дырочную (положительную) проводимость, а примеси V группы – электронную (отрицательную). Контакт *p*- или *n*-полупроводников приводит к образованию между ними контактного электрического поля, играющего чрезвычайно



**Рис. 2.** Схема работы солнечного фотоэлемента.

важную роль в работе солнечного фотоэлемента. Поясним причину возникновения контактной разности потенциалов. При соединении в одном монокристалле полупроводников *p*- и *n*-типа возникает диффузионный поток электронов из полупроводника *n*-типа в полупроводник *p*-типа и, наоборот, поток дырок из *p*- в *n*-полупроводник. В результате такого процесса прилегающая к *p*-*n* переходу часть полупроводника *p*-типа будет заряжаться отрицательно, а прилегающая к *p*-*n* переходу часть полупроводника *n*-типа, наоборот, приобретет положительный заряд. Таким образом, вблизи *p*-*n* перехода образуется двойной заряженный слой, который противодействует процессу диффузии электронов и дырок. Действительно, диффузия стремится создать поток электронов из *n*-области в *p*-область, а поле заряженного слоя, наоборот, — вернуть электроны в *n*-область. Аналогичным образом поле в *p*-*n* переходе противодействует диффузии дырок из *p*- в *n*-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 *n*-полупроводника, а дырок из *p*-полупроводника. Другими словами, в области *p*-*n* перехода возникает энергетический (потенциальный) барьер, для преодоления которого электроны из *n*-полупроводника и дырки из *p*-полупроводника должны затратить определенную энергию. Не останавливаясь на описании электрических характеристик *p*-*n* перехода, который широко используется в выпрямителях, транзисторах и других полупроводниковых приборах, рассмотрим работу *p*-*n* перехода в фотоэлементах.

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 (рис. 2). 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 соот-

ветствует “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.

Мы рассмотрели процесс возникновения фотоЭДС, возникающей на контактах к *p*- и *n*-областям *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 питающего 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. В пластине создаются области с *p*- и *n*-типами проводимости (рис. 2). В качестве методов создания этих областей используется, например, метод диффузии примесей или метод наращивания одного полупроводника на другой. Затем изготавливаются нижний и верхний электроконтакты (на рисунке электроды заштрихованы), причем нижний контакт — сплошной, а верхний выполняется в виде гребенчатой структуры (тонкие полосы, соединенные относительно широкой токосборной шиной).

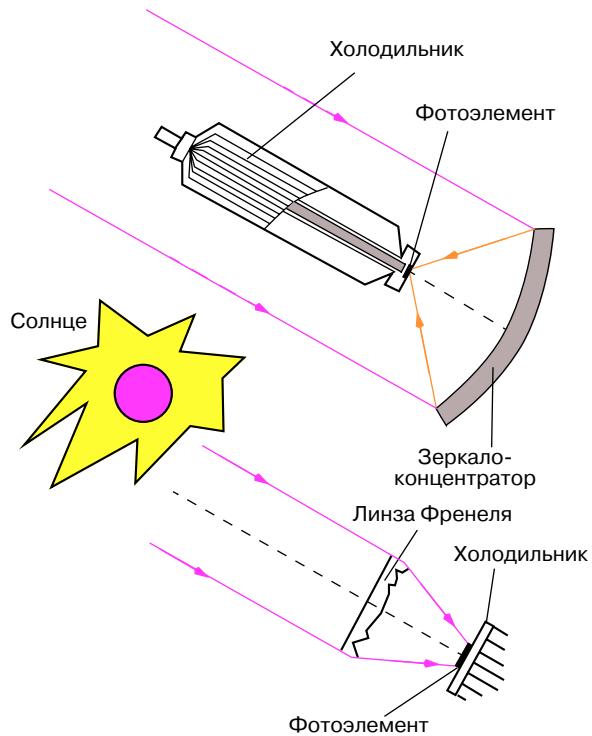
Основным материалом для получения солнечных элементов является кремний. Технология получения полупроводникового кремния и фотоэлементов на его основе базируется на методах, разработанных в микроэлектронике — наиболее развитой промышленной технологии. Кремний, по-видимому, вообще один из самых изученных 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.

До недавнего времени солнечные батареи наземного применения, так же как и космического, изготавливали на основе относительно дорогого монокристаллического кремния. Снижение стоимости исходного кремния, разработка высокопроизводительных методов изготовления пластин из слитков и прогрессивных технологий изготовления солнечных элементов позволили в несколько раз снизить стоимость наземных солнечных батарей на их основе. Основными направлениями работ по дальнейшему снижению стоимости "солнечной" электроэнергии являются: получение элементов на основе дешевого, в том числе ленточного, поликристаллического кремния; разработка дешевых тонкопленочных элементов на основе аморфного кремния и других полупроводниковых материалов; осуществление преобразования концентрированного солнечного излучения с помощью высокоэффективных элементов на основе кремния и относительно нового полупроводникового материала алюминий–галлий–мышьяк.

На рисунке 3 показаны две принципиальные схемы фотоэлектрических установок с концентраторами солнечного излучения в виде зеркал (вверху) и линз Френеля (внизу). Линза Френеля представляет собой выполненную из оргстекла пластину толщиной 1 – 3 мм, одна сторона которой является плоской, а на другой образован профиль в виде концентрических колец, повторяющий профиль выпуклой линзы. Линзы Френеля существенно дешевле обычных выпуклых линз и обеспечивают при этом степень концентрирования в 2 – 3 тысячи "солнц".

В последние годы в мире достигнут значительный прогресс в области разработки кремниевых солнечных элементов, работающих при концентрированном солнечном облучении. Созданы кремниевые элементы с КПД > 25% в условиях облучения на поверхности Земли при степени концентрирования 20 – 50 "солнц". Значительно большие степени концентрирования допускают фотоэлементы на основе полупроводникового материала алюминий–галлий–мышьяк, впервые созданные в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе в 1969 году. В таких солнечных элементах достигаются значения КПД > 25% при степени концентрирования до 1000 крат. Несмотря на большую стоимость таких элементов, их вклад в стоимость получаемой электроэнергии не оказывается определяющим при высоких степенях концентрирования солнечного излучения вследствие существенного (до 1000 раз) снижения их площади. Ситуация, при которой стоимость фотоэлементов не дает существенного вкла-



**Рис. 3.** Схемы фотоэлектрических энергоустановок с концентраторами солнечного излучения.

да в общую стоимость солнечной энергоустановки, делает оправданным усложнение и удорожание фотоэлемента, если это обеспечивает увеличение КПД. Этим объясняется внимание, уделяемое в настоящее время разработкам каскадных солнечных элементов, которые позволяют достичь существенного увеличения КПД. В каскадном солнечном элементе солнечный спектр расщепляется на две (или более) части, например, видимую и инфракрасную, каждая из которых преобразуется с помощью фотоэлементов, выполненных на основе различных материалов. В этом случае снижаются потери энергии квантов солнечного излучения. Например, в двухэлементных каскадах теоретическое значение КПД превышает 40%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из сказанного выше следует вывод о перспективности фотоэлектрической солнечной энергетики. Солнечное излучение является практически неисчерпаемым источником энергии, оно поступает во все уголки Земли, находится "под рукой" у любого потребителя и является экологически чистым доступным источником энергии.

Недостатком солнечного излучения как источника энергии является неравномерность его поступления на земную поверхность, определяемая суточной и сезонной цикличностью, а также погодными

условиями. Поэтому весьма важной является проблема аккумулирования электроэнергии, вырабатываемой с помощью солнечных энергоустановок. В настоящее время эта проблема решается в основном путем использования обычных химических накопителей – аккумуляторов. Одним из перспективных способов аккумулирования является использование электроэнергии для электролиза воды на водород и кислород с последующим хранением и использованием водорода в качестве экологически чистого топлива, так как при сгорании водорода образуются только пары воды.

Крупномасштабное развитие фотоэнергетики даст огромный толчок развитию районов Земли с высоким среднегодовым поступлением солнечного излучения. Это касается в первую очередь пустынных и засушливых районов, которые с “приходом” солнечной электроэнергии станут районами, пригодными для активного земледелия – житницами Земли. Значит ли это, что усилия специалистов надо сосредоточить только на разработке фотоэлектрических преобразователей и решении непосредственно связанных с ними проблем? Конечно, нет. Нельзя развивать какое-то одно направление за счет подавления других направлений. Это же касается и электроэнергетики: ее нельзя строить, базируясь только на одном виде ресурсов. Она должна основываться на многих источниках: солнечных, ветровых, атомных и, конечно, на традиционных, ископаемых источниках. Это позволит найти опти-

мальные пути их взаимодействия, постепенно переходя к совершенной, экологически чистой и надежной энергетике будущего.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Васильев А.М., Ландсман А.П.* Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Сов. радио, 1971.
2. *Алферов Ж.И.* Фотоэлектрическая солнечная энергетика / В сб.: Будущее науки. М.: Знание, 1978. С. 92 – 101.
3. *Колтун М.М.* Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985.
4. *Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д.* Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука, 1989.
5. *Колтун М.М.* Солнечные элементы. М.: Наука, 1987.
6. *Грилихес В.А., Орлов П.П., Попов Л.Б.* Солнечная энергия и космические полеты. М.: Наука, 1984.

\* \* \*

Вячеслав Михайлович Андреев – известный специалист в области солнечной фотоэнергетики, автор более 160 научных статей и двух монографий. Лауреат Ленинской и Государственной премий. Является профессором кафедры оптоэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета. В настоящее время занимается разработками высокоэффективных каскадных солнечных элементов на основе гетероструктур и фотопреобразователей концентрированного солнечного излучения.