

Варианты реализации подходящих по уровню инсоляции площадей под ФСБ наземного применения

Как показал опыт наземного применения ФСБ, для автономного обеспечения солнечной электроэнергией жилого дома с семьей из трех человек, оснащенного современным бытовым электрооборудованием, оптимальной является величина $P_{\text{ФСБ}} \approx 10$ кВт. Как вытекает из таблицы 1.10, в зависимости от типа ФСБ с КПД от 10 % до 20 % для обеспечения такой величины $P_{\text{ФСБ}}$ величина $S_{\text{ФСБ}}$ должна составлять соответственно от 120 м² до 60 м², что соответствует значениям $l_{\text{ФСБ}}$ примерно от 11 м до 8 м. Это вполне вписывается, например, в габаритные планарные размеры кровли современного дома указанного типа. Указанное способствовало широкому внедрению в начале первой декады XXI века такого автономного способа электрификации не только отдельных индивидуальных жилых домов, как ранее, но и их подавляющего большинства в ряде современных небольших жилых поселков. На Рис. 1.43 приведены характерные примеры акцентированной новации.



а



б

Рисунок 1.43 – Фотоэлектрические солнечные батареи на крышах жилых домов и коммерческих зданий в современных пригородных поселках: *а* – в окрестностях Токио (Япония); *б* – в пригороде Сакраменто (штат Калифорния, США)

Для сетевых потребителей солнечной электроэнергии мощностью от сотен кВт до десятков МВт и более нужны на много порядков обширнее площади $S_{\text{ФСБ}}$ (см. Табл. 1.9). Объемы промышленного производства ФСБ из пленочных ФЭП на жестких подложках в США, Германии, Японии позволили построить в 2001-2010 годах на достаточно больших земельных площадях, малопригодных для других применений, ФСЭС мощностью до 80 МВт.

Самая крупная современная ФСЭС, ранее построенная согласно проекту «Сарния» в провинции Онтарио (Канада) из более 1 000 000 ФСБ с ФЭП на основе пленочного CdTe, имела в 2010 году пиковую мощность 97 МВт. Ее общий вид и отдельные фрагменты изображены на Рис. 1.44.



а

б

в

Рисунок 1.44 – Самая крупная в мире по состоянию на конец 2010 года ФЭС «Сарния» мощностью 97 МВт из более 1 000 000 ФСБ с ФЭП на основе пленочного CdTe (юго-запад провинции Онтарио, Канада): *а* – общий вид; *б* – фрагмент одного из полей с солнечными батареями; *в* – фрагмент одного из рядов поля солнечных батарей

Второе и третье места в мире по мощности по состоянию на конец 2010 года делили между собой две европейские ФЭС, построенные в Олмедилла (Испания) – 60 МВт и «Либерозе» в Турнов-Прайлак (Германия) – 53 МВт также из ФСБ с ФЭП на основе пленочного CdTe. Электростанция «Либерозе» состоит из 560 000 ФСБ и занимает площадь 162 Га размером более 210 футбольных полей. Ее общий вид и отдельные фрагменты изображены на Рис. 1.45.



а

б

в

Рисунок 1.45 – ФЭС «Либерозе» мощностью 53 МВт из 560 000 ФСБ с ФЭП на основе пленочного CdTe (Турнов-Прайлак, Германия): *а* – общий вид; *б* – фрагмент одного из полей с солнечными батареями; *в* – фрагмент с несколькими рядами поля солнечных батарей

Однако уже сейчас начала складываться реальная перспектива превращения одного из регионов Украины - Крыма в мировой центр фотоэлектрэнергетики, по крайней мере, на ближайшее десятилетие. Для этого существуют сложившиеся в последние годы следующие объективные предпосылки.

Нестабильная политическая ситуация на Ближнем Востоке, грозящая перебоями в поставках нефти, и недавняя авария на японской АЭС «Фукусима-1» подстегнули развитые страны еще интенсивнее развивать альтернативную энергетику. Согласно выводам Межправительственной экспертной группы по климатическим изменениям (IPCC), при условии продуманной и устойчивой государственной поддержки программ развития альтернативной энергетики к 2050 г. почти 80 % совокупного мирового

энергопотребления будут составлять возобновляемые источники. Поэтому вложения в этот сектор считаются одними из самых перспективных. На значительную долю инвестиций может рассчитывать и Украина, которая за последние годы сумела создать весьма выгодные условия для привлечения капитала в «зеленую» энергетику страны.

В первой половине 2011 года австрийская компания «Актив Солар» завершила строительство и начала процесс ввода в эксплуатацию солнечной электростанции «Омао Солар» мощностью 20 мегаватт в Крыму (Сакский район). «Омао Солар» – это только 1-я очередь проекта «Охотниково» – одной из крупнейших ФЭП-инсталляций в мире. Ранее, «Актив Солар» успешно завершила ввод в эксплуатацию 7,5 мегаватт мощностей солнечной электростанции в селе Родниковое (Крым, Симферопольский район). Проект «Охотниково» (по названию населенного пункта, рядом с которым продолжалось наращивание мощностей) рассчитан таким образом, что к концу 2011 года мощность ФЭС «Омао Солар» должна была быть доведенной примерно до 80 МВт. Для этого компания «Актив Солар» ежедневно устанавливала ФСМ из кристаллических Si-ФЭП на суммарную пиковую мощность около 1 МВт. После завершения установки ФСМ общей мощностью около 83 МВт солнечная электростанция состоит из 355 902 модулей, расположенных на площади в 160 гектаров, что равно размеру примерно 207 футбольных полей. Станция производит 100 ГВт·часов электроэнергии в год, которой достаточно, чтобы обеспечить 20 000 домашних хозяйств «зеленой» энергией и позволяет сократить до 84 тысяч тонн выбросов углекислого газа в год.

Общий вид и отдельные фрагменты ФЭС «Омао Солар» изображены на Рис. 1.46.

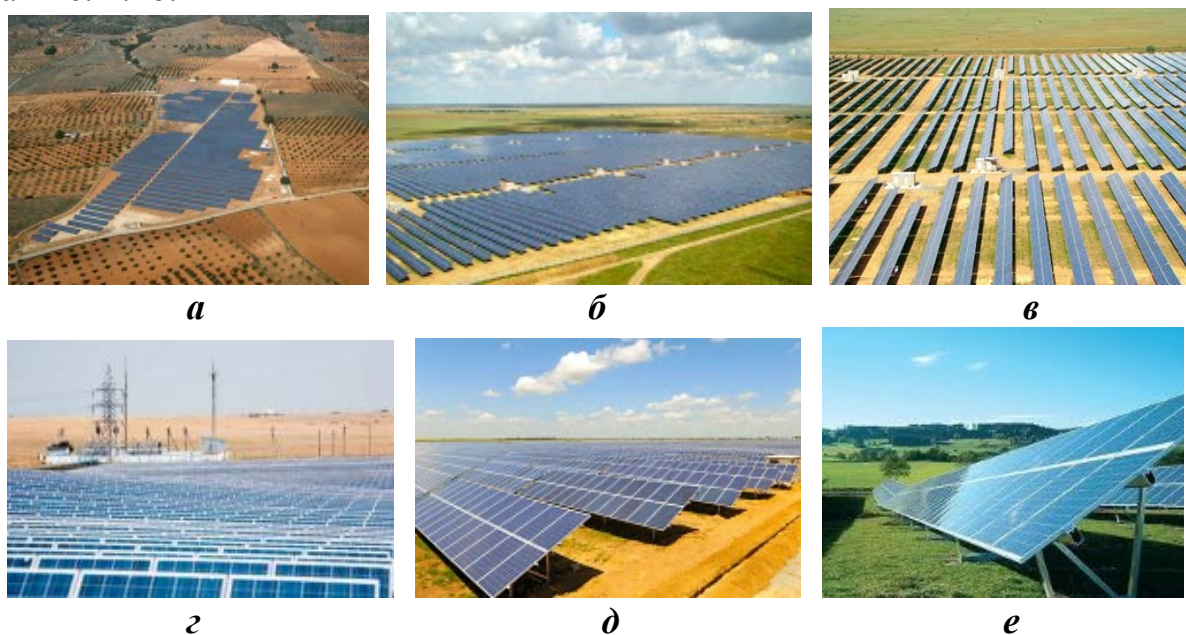


Рисунок 1.46 – Украинская ФЭС «Омао Солар» с исходной установленной мощностью 83 МВт согласно проекту «Охотниково» (Крым, Сакский район) из 355 902 ФСМ на основе кристаллических Si-ФЭП:

a - общий вид; *б, в, г, д* – фрагменты разных полей с ФСМ; *е* - фрагмент одного из рядов поля ФСМ

Параллельно с проектом «Охотниково» в течение 2011-2012 годов компания «Актив Солар» успешно реализовала в Украине еще 3 ФЭП-инсталляционных проекта: 2 - в Крыму (солнечные электростанции «Перово» и «Митяево») и 1 - в Одесской области (солнечная электростанция «Староказачье»). Ниже приведены некоторые наиболее важные параметры для этих электростанций (**Смотря:** <http://www.activsolar.at/>).

Солнечная электростанция «Перово»:

проектная мощность - 105,6 МВт (мировой рекорд по состоянию на конец 2011 года);

количество ФСМ – 455 532;

земельная площадь – 200 гектар;

сокращение годового количества выбросов CO₂ – 109 918 тонн.

Солнечная электростанция «Митяево»:

проектная мощность - 31,6 МВт;

количество ФСМ – 134 760;

земельная площадь – 59 гектар;

сокращение годового количества выбросов CO₂ – 32 425 тонн.

Солнечная электростанция «Староказачье»:

проектная мощность - 42,9 МВт;

количество ФСМ – 185 952;

земельная площадь – 80 гектар;

сокращение годового количества выбросов CO₂ – ? тонн.

В то же время природно-климатический потенциал позволяет размещать в Украине сетевые ФСЭС суммарной мощностью не менее 4 ГВт.

Справка:

«Актив Солар» (Activ Solar) – международная группа компаний со штаб-квартирой в Вене (Австрия), специализируется на разработке и производстве солнечных технологий. Основными направлениями деятельности компании является производство кремниевых продуктов и развитие крупномасштабных фотоэлектрических солнечных парков. ЧАО «Завод полупроводников» (г. Запорожье, Украина) является дочерним предприятием Activ Solar, история производства поликремния на котором началась еще с 1964 года. Activ Solar, занимается планированием, финансированием и реализацией крупномасштабных проектов солнечной энергетики, объединяя специалистов мирового класса, стратегических партнеров и ведущие технологии.

Между тем, грандиозный рост к 2100 году мировых потребностей в дешевой солнечной фотоэлектрической энергии (Табл. 1.7 и 1.8) вызовет необходимость использования под сетевые ФЭС несравненно больших по площади (Табл. 1.9), хорошо облучаемых солнечным светом и малопригодных для жизнедеятельности поверхностей планеты. Согласно спутниковым исследованиям наиболее подходящими для этого являются районы пустынь: **Сахара** (Северная Африка), **Гоби** (Монголия), **Большая Песчаная** (Австралия), **Тар** (Индостан), **Сонора** (Северная Америка), **Негев** (Аравийский п-ов), - показанные на карте земного шара вместе с данными о

их фотоэлектрических ресурсах (ФЭР) в тераваттах (Рис. 1.47).

Как видно из этих данных в сравнении с приведенными в таблицах 1.7 и 1.8, только ФЭР пустыни Сахара, составляющий 626 ТВт, примерно в 40 раз превышает мировые потребности по электричеству и топливам в первой декаде XXI века и сохранит их превышение примерно в 6 раз к 2100 году.

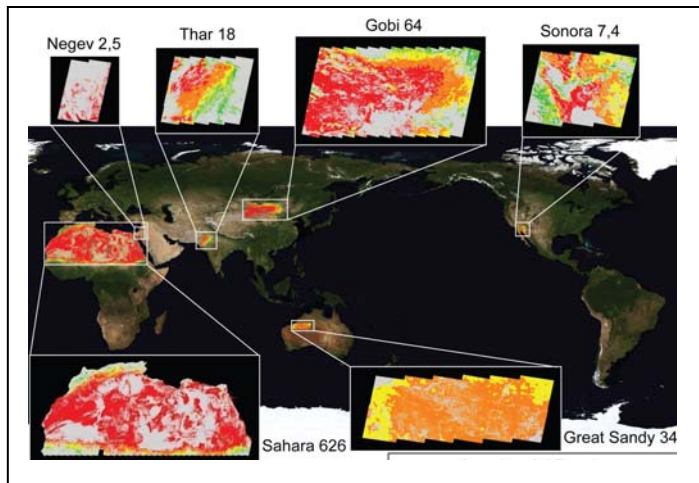


Рисунок 1.47 – География и ФЭР пустынь

В связи с акцентированными обстоятельствами уже сейчас положено начало грандиозному международному проекту “**Desert Tech**” (сокращенно “**Desertec**”), в рамках которого, начиная с 2009 года, **страны ЕС** (Германия, Испания, Франция и др.) объединяют свои усилия и ресурсы с **рядом стран Северной Африки и Среднего Востока** (Марокко, Тунис, Алжир, Египет, Ливия, ОАЭ, Кувейт, Саудовская Аравия и др.) для **строительства более 10 СЭС**, суммарная установленная мощность которых к 2050 году должна составить **100 ГВт**. Размещение СЭС в Северной Африке и на Аравийском полуострове, а также связь СЭС с Европой показывает Рис. 1.48.

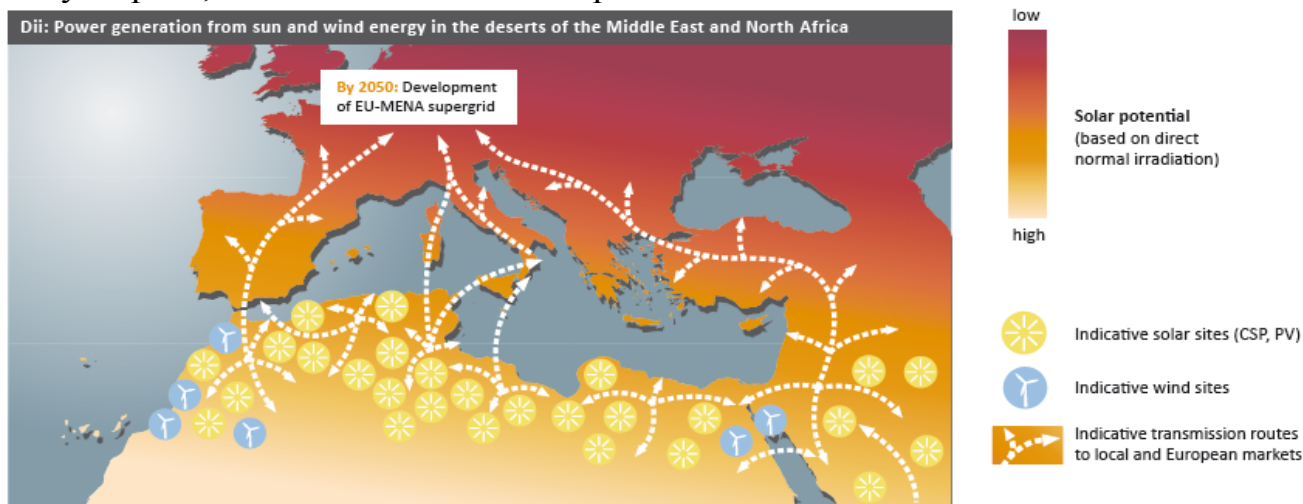


Рисунок 1.48 - Размещение СЭС в Северной Африке и на Аравийском полуострове, а также связь СЭС с Европой



Не менее 25 % указанной мощности будет обеспечена за счет создания фотоэлектрических кластеров в составе каждой СЭС. Страны ЕС получают 15-20 % вырабатываемой этими СЭС электроэнергии, которая будет передаваться по трансконтинентальным кабелям, проложенным по дну Средиземного моря. Стоимость проекта 400 млрд. Евро.

Рисунок 1.49 – Площади Северной Африки (красные квадраты), необходимые для обеспечения фотоэлектрической солнечной энергией потребностей по состоянию на 2005 год: мировых (World – $1,14 \cdot 10^5 \text{ км}^2 = 338 \text{ км} \times 338 \text{ км}$); 25 стран ЕС (EU – $1,92 \cdot 10^4 \text{ км}^2 = 139 \text{ км} \times 139 \text{ км}$); стран, на территории которых будут построены СЭС (MENA – страны Среднего Востока и Северной Африки – $3,6 \cdot 10^2 \text{ км}^2 = 60 \text{ км} \times 60 \text{ км}$)

На рисунке 1.50 показаны фрагменты фотоэлектрических кластеров СЭС из ФСМ на основе ФЭП различного типа, которые планируются к использованию для реализации проекта “Desertec”.

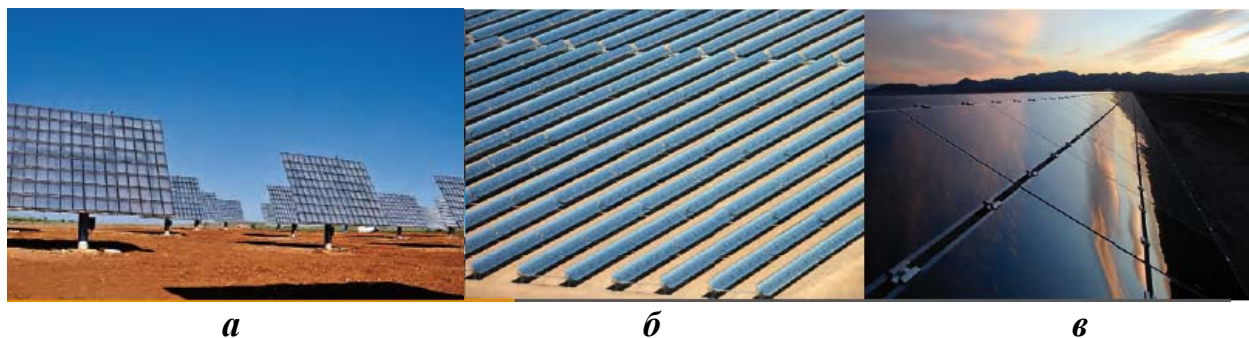


Рисунок 1.50 - Фрагменты фотоэлектрических кластеров СЭС из ФСМ на основе ФЭП различного типа, которые планируются к использованию для реализации проекта “Desertec”: *а* – концентраторные ФСМ из гетеропереходных GaAs-ФЭП на 2D-поворотных трекерах; *б* – поле ФСМ стационарного типа из кристаллических Si-ФЭП; *в* – фрагмент одного из рядов поля ФСМ стационарного типа на основе гетеропереходных пленочных CdTe-ФЭП или CIGS-ФЭП

Принципиально новая космически-земная гелиоэнергетика

Однако даже использование указанных выше пустынь с их громадным гелиоэнергетическим потенциалом **не лишено недостатка с точки зрения круглосуточного всесезонного снабжения глобальной электрической сети** необходимым количеством фотоэлектрически преобразованной

солнечной энергии. Поэтому еще в начале второй половины XX века доктор Петер Глазер (компания «Боинг», США) предложил концепцию проекта по созданию на геостационарной орбите (высота около 38 000 км) не менее двух космических платформ мощностью до 10 ГВт, площадью до 50 км² и массой около 20 000-30 000 тонн каждая, круглосуточно осуществляющих широкомасштабное фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии за пределами земной атмосферы с КПД около 15 % и транслирующих ее на приемные наземные устройства с помощью лазерного или СВЧ излучения. Иллюстрация этой концепции схематически представлена на Рис. 1.51.



Рисунок 1.51 – Схематическая иллюстрация концепции проекта П. Глазера: *правый верхний угол рисунка* – одна из космических фотоэлектрических платформ (КФП) на геостационарной орбите; *конус с вершиной на платформе* – излучаемый КФП поток электромагнитной энергии, полученной в результате фотоэлектрического преобразования солнечной энергии; *круглое светло-голубое поле* – наземное приемное устройство (НПУ); *кубик слева от НПУ* – связанная кабелем с НПУ инверторная станция, передающая солнечную электроэнергию сетевым потребителям.

Министерством энергетики США был проведен детальный анализ затрат, необходимых для создания первого образца солнечной космической электростанции (СКЭС) такого типа после 2000 г. с установленной мощностью 5 ГВт. При этом расчетная сумма затрат составила около 102 млрд. \$_{США}, что определяло стоимость 1 Ватта установленной мощности свыше 20 \$_{США} в сравнении экономически оправданной стоимостью для наземного применения около 1 \$_{США}.

Министерством энергетики США был проведен детальный анализ затрат, необходимых для создания первого образца солнечной космической электростанции (СКЭС) такого типа после 2000 г. с установленной мощностью 5 ГВт. При этом расчетная сумма затрат составила около 102 млрд. \$_{США}, что определяло стоимость 1 Ватта установленной мощности свыше 20 \$_{США} в сравнении экономически оправданной стоимостью для наземного применения около 1 \$_{США}.

Дальнейшие технико-экономические оценки Национальной академии наук США показали, что для обеспечения требуемой экономической эффективности системы СКЭС ее установленная мощность должна быть не менее 300 ГВт и стоить не более 300 млрд. \$_{США}. Это означает, что на геостационарной орбите должно находиться 60 существенно модернизированных и монтируемых значительно более дешевым способом СКЭС, каждая из которых обеспечивает 5 ГВт пиковой мощности.

С рассматриваемой целью национальными аэрокосмическими агентствами США и впоследствии Европы были стимулированы предварительные эвристические проработки подобных осовремененных проектов, предполагающих следующий принцип использования СКЭС. На СКЭС с суперлегкими пленочными ФЭП слабоконцентраторного типа ($2 < K_{\text{и}} < 6$) осуществляется преобразование солнечного излучения в СВЧ и лазерное излучение, которое с помощью специальных антенн и силовых оптических систем направляется к Земле и различным космическим объектам.

На Земле СВЧ-излучение улавливается концентрирующими системами и преобразуется в электроэнергию в мощных агрегатах типа циклотронных преобразователей энергии. Часть полученной таким путем электроэнергии поступает в земную электросеть прежде всего для электроснабжения производств, участвующих в создании космической техники, а также для удовлетворения других энергетических потребностей на Земле. Другая часть полученной с помощью СКЭС энергии подводится к мощным наземным лазерным установкам, которые передают ее в виде узконаправленного излучения на борты тяжелых ракет-носителей с лазерными двигателями, использующими в качестве рабочего тела воду, водород или атмосферный воздух.

Лазерные установки, находящиеся на борту СКЭС, обеспечивают энергией межорбитальные транспортные аппараты с лазерными или электроракетными двигателями и различные космические аппараты, станции, базы,

производственные комплексы, входящие в состав информационных, промышленных и строительно-монтажных орбитальных систем. В некоторых случаях для передачи энергии в космосе может оказаться целесообразным использование СВЧ-излучения, например для питания мощных микроволновых ракетных двигателей, осуществляющих прямое преобразование лучистой энергии в кинетическую энергию ускоряемых частиц рабочего тела.

Таким образом, в обозримой перспективе с помощью систем СКЭС можно будет осуществлять эффективное централизованное энергоснабжение всех земных и космических потребителей, участвующих в процессе индустриализации космического пространства. В более отдаленном будущем грузопоток с Земли в космос должен сократиться и энергия СКЭС будет использоваться главным образом для добычи, транспортировки и переработки сырьевых ресурсов космического пространства и частичного удовлетворения нарастающего энергопотребления на Земле.

На Рис. 1.52 приведены иллюстрации, соответствующие современным представлениям о способах воплощения концепции П. Глазера в

принципиально новую космически-земную гелиоэнергетику, которая должна стать основой индустриализации околоземного пространства.

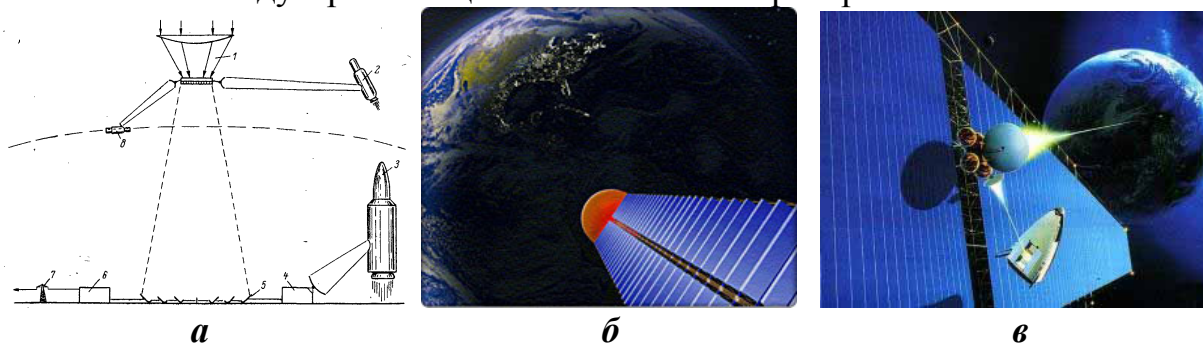


Рисунок 1.52 - Современные представления о способах воплощения концепции П. Глазера в принципиально новую космически-земную гелиоэнергетику: **а** – схема путей использования преобразованной СКЭС солнечной энергии (1 – СКЭС; 2 – межорбитальный транспортный аппарат; 3 - тяжелый транспортный аппарат типа земля-космос; 4 – наземная энерго-лазерная станция; 5 – наземная антенна для приема СВЧ-излучения со СКЭС; 6 - электроподстанция; 7 – линия электропередачи; 8 – орбитальный космический аппарат - КА); **б**- СКЭС типа «солнечная башня» (красный диск – антенна для трансляции на Землю энергии с помощью СВЧ-излучения; голубые плоскости – панели со слабоконцентраторными пленочными ФЭП); **в** - СКЭС «парусного» типа (показаны трансляция энергии на Землю с помощью СВЧ-излучения и заправка энергией орбитального КА)

Первыми реальными шагами в эру новой космически-земной гелиоэнергетики и дальнейшего освоения с ее помощью Солнечной системы можно считать:

- **транспортные космические корабли** (русские «Союз» и «Прогресс»; американские типа «Шаттл», на смену которым после 2011 года придут «Орион», «[Dragon SpaceX](#)», «[Сигнус](#)», «[CST-100](#)»; европейский «[ATV](#)»; японский «[HTV](#)»)

- **орбитальные космические станции** («Мир» и затем «МКС»).

«МКС» - Международная космическая станция (*International Space Station*, сокр. *ISS*) - совместный международный проект, в котором участвуют 23 страны (в алфавитном порядке; ключевые в настоящее время участники подчеркнуты): [Австрия](#), [Бельгия](#), [Бразилия](#), [Великобритания](#), [Германия](#), [Греция](#), [Дания](#), [Ирландия](#), [Испания](#), [Италия](#), [Канада](#), [Люксембург](#), [Нидерланды](#), [Норвегия](#), [Португалия](#), [Россия](#), [США](#), [Финляндия](#), [Франция](#), [Чехия](#), [Швейцария](#), [Швеция](#), [Япония](#).

Сборка начата 20 ноября 1998 года.

Технические характеристики после 10 лет строительства:

Масса – 417 тонн.

Габаритные размеры – $73 \times 58 \times 27 \text{ м}^3$.

Жилой объем – 907 м^3 .

Мощность фотоэлектрических солнечных батарей на основе GaAs – 120 кВт.

Полетные данные:

Высота орбиты – 337-351 км.

Орбитальная скорость – 27 700 км/ч.

Оборотов в сутки – 16.

Пройденное расстояние на 17.09.2011 - 3 118 847 020 км.

Обитаема с [31 октября 2000 года](#).

Экипаж – 6 человек.

Эволюция конструкции МКС в процессе ее строительства показана на Рис. 1.53. Более подробно см.: <http://ru.wikipedia.org/.../> (МКС).

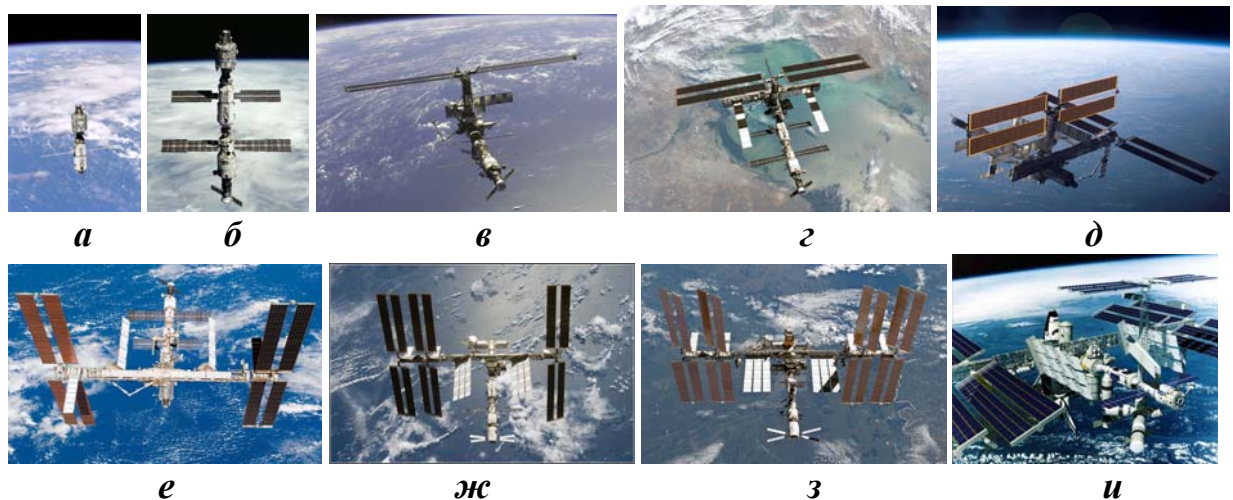


Рисунок 1.53 - Эволюция конструкции МКС в процессе ее строительства: *а* – 1999 г.; *б* – 2000 г.; *в* – 2002 г.; *г* – 2005 г.; *д* – 2006 г.; *е* - 2007 г.; *ж* – 2008 г.; *з* – 2011 г.; *и* – в ближайшей перспективе

К стратегическим задачам МКС относятся:

- обеспечение сборки за пределами земной атмосферы крупных конструкционных блоков СКЭС и межорбитальных транспортных аппаратов для доставки этих блоков на геостационарную орбиту и окончательного монтажа СКЭС;
- выполнение функции заатмосферного космодрома для полетов к другим планетам Солнечной системы.

Пример новых возможностей космической техники, связанных с совершенствованием фотоэлектрических солнечных батарей

В начале XXI века высокоэффективные арсенид-галлиевые ФЭП стали все шире применяться для энергообеспечения различных космических аппаратов. Так, например, ФСБ на их основе позволили существенно расширить функциональные возможности марсоходов нового поколения, к которым относятся американские роверы-близнецы «Спирит» и «Опортьюнити», доставленные на поверхность Марса в январе 2004 года. Масса каждого из них составляла около 175 кг; высота – 1,5 м; **размах фотоэлектрических солнечных батарей – 2,3 м**; диаметр каждого из 6 колес – 25 см. Аппараты были оснащены компьютером, буром, несколькими видеокамерами, микроскопом и двумя [спектрометрами](#), смонтированными на [манипуляторе](#). **Установленная мощность ФСБ составляла около 500 Вт.** Внешний вид и комментарии к конструктивным особенностям этих

марсоходов приведены на Рис. 1.54. Там же для сравнения показан первый из американских марсоходов конца XX века «Соджонер», который имел массу чуть более 10 кг, высоту 28 см, длину 63 см и ширину 48 см.

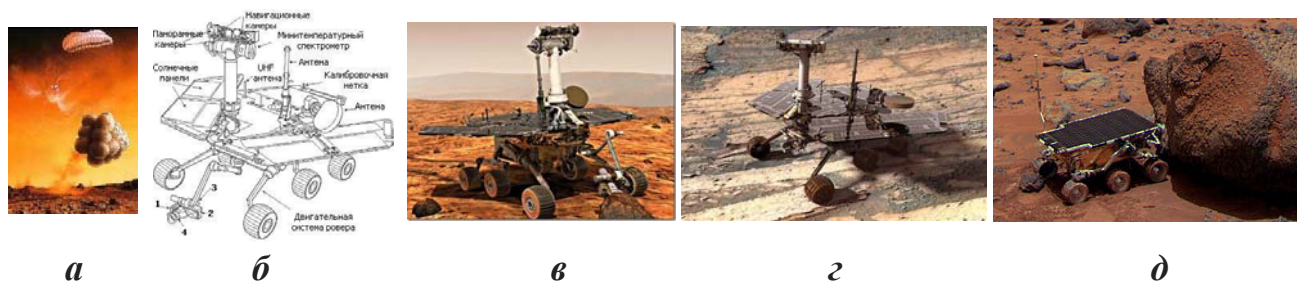


Рисунок 1.54 – Фотоэлектрические арсенид-галлиевые солнечные батареи на американских марсоходах: *а* – мягкая доставка на поверхность Марса; *б* - конструктивные особенности марсоходов «Спирит» и «Опортьюнити» (1 - блок микроскопа и видеокамеры; 2 – спектрометр для определения с высокой точностью содержания железа в породах; 3 - рентгеновский спектрометр для химического анализа; 4 – прибор для очистки изучаемой поверхности; остальное поименовано на эскизе); *в, г, д* – внешний вид марсоходов «Спирит» (*в*), «Опортьюнити» (*г*) и «Соджонер» (*д*)

Каждый из марсоходов-близнецов проработал на Марсе около 6 лет, чему несомненно способствовала высокая устойчивость ФСБ к деградации под влиянием многих внешних факторов. Дело «Спирит» и «Опортьюнити» продолжит куда больший по размерам и возможностям ровер под названием Mars Science Laboratory – MSL («Марсианская научная лаборатория»), который доставлен на Марс в начале августа 2012 года. Этот колесный робот НАСА, получивший имя Curiosity («Любопытство») весит в четыре раза больше и несет на себе в десять раз больше приборов, чем два предшествующих марсохода. MSL имеет 3 метра в длину, 2,1 метра в высоту и 2,7 метра в ширину. Диаметр колёс составляет примерно 51 [сантиметр](#). Вес марсохода 900 килограммов (включая 80 килограммов исследовательского оборудования). Он представляет собой автономную химическую лабораторию. Однако вместо ФСБ источником электроэнергии для питания этого марсохода запланирован радиоизотопный термоэлектрический генератор, в качестве топлива для которого являются стронций-90 и плутоний-238. Это вызвано необходимостью противостоять длительному воздействию песчаных бурь, которые могут вывести из строя солнечные батареи, засыпав их слоем песка (как это имело место для марсохода «Спирит»). Внешний вид марсохода нового поколения «Любопытство» и печальный финал работы «Спирит» показаны на Рис. 1.55.



a



б



в

Рисунок 1.55 – Марсоходы: *a* - «Любопытство»; *б, в* – «Спирит» после песчаной бури с завязшими в глубоком песке колесами (*б*) и с покрытыми слоем песка ФСБ (*в*)