

## Первая половина XXI века

### ГЛОБАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ И ОБЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ФОТОЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

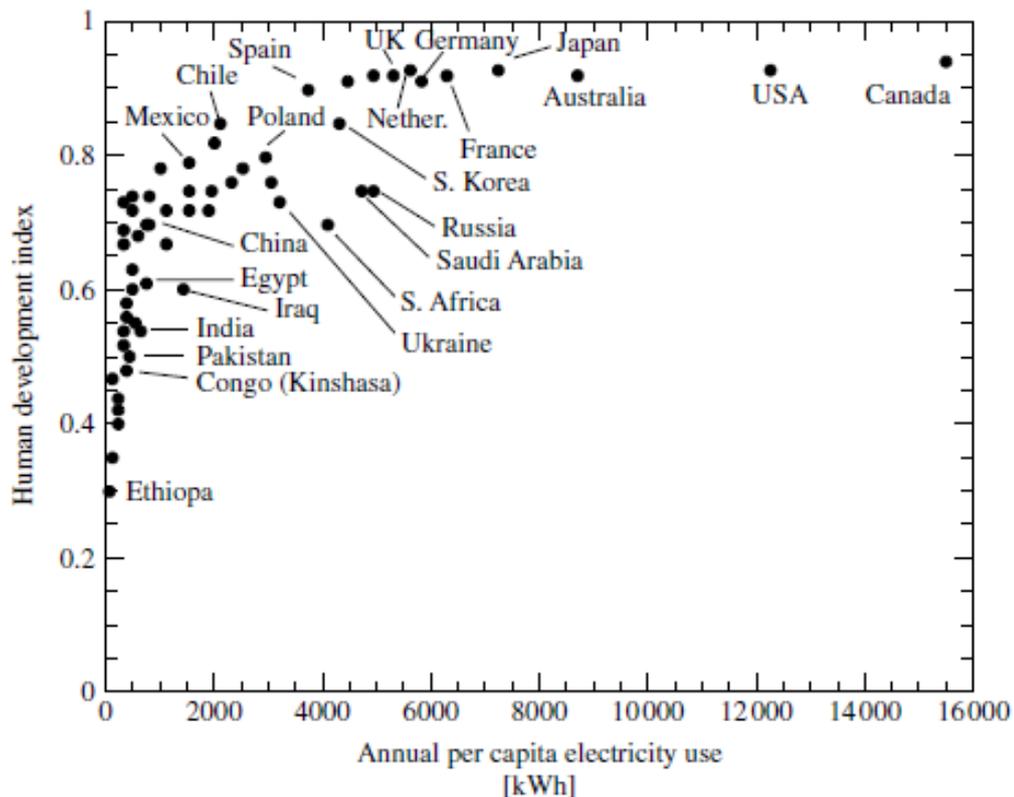
#### Энергетическая и экологическая проблемы

Уровень развития народонаселения стран земного шара согласно критериям ООН определяется применительно к каждой из них ожидаемой продолжительностью жизни, качеством образования и объемом внутреннего валового продукта на душу населения. По перечисленным критериям этот уровень количественно оценивается индексом развития человеческого потенциала (англоязычный аналог “Human development index” – HDI), который в относительных единицах варьируется от 0 до 1.

Очевидный пример  $HDI \approx 0$  относится к аборигенам – в частности, экваториальной Африки, Новой Зеландии, островов Океании в Тихом океане севернее Австралии (ближе к экватору).

Противоположный пример  $0,90 < HDI < 0,95$  относится к жителям Испании, Англии, Нидерландов, Германии, Франции, Японии, северного побережья Австралии, США и Канады. Для России  $HDI \approx 0,77$ ; для Украины  $HDI \approx 0,74$ ; для Пакистана  $HDI \approx 0,50$ ; для Эфиопии  $HDI \approx 0,30$ .

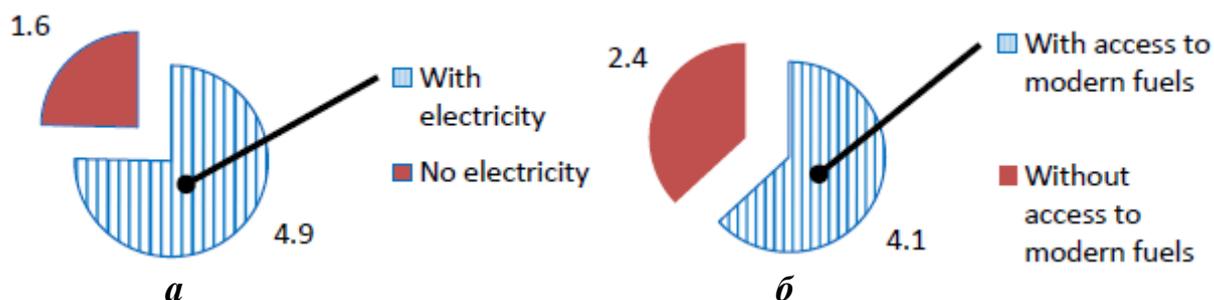
Одним из ключевых факторов, существеннейшим образом влияющим на HDI, является количество ежегодного потребления электроэнергии  $W_{арс}$ , приходящееся на душу населения в стране (annual per capita). Эта зависимость, установленная ООН для более 60 стран с общей численностью населения свыше 90 % численности жителей Земли, показана на Рис. 1.33.



**Рисунок 1.33** – Зависимость индекса развития человеческого потенциала (HDI) в различных странах от ежегодного потребления электроэнергии ( $W_{арс}$ ), приходящегося на душу населения в каждой из этих стран

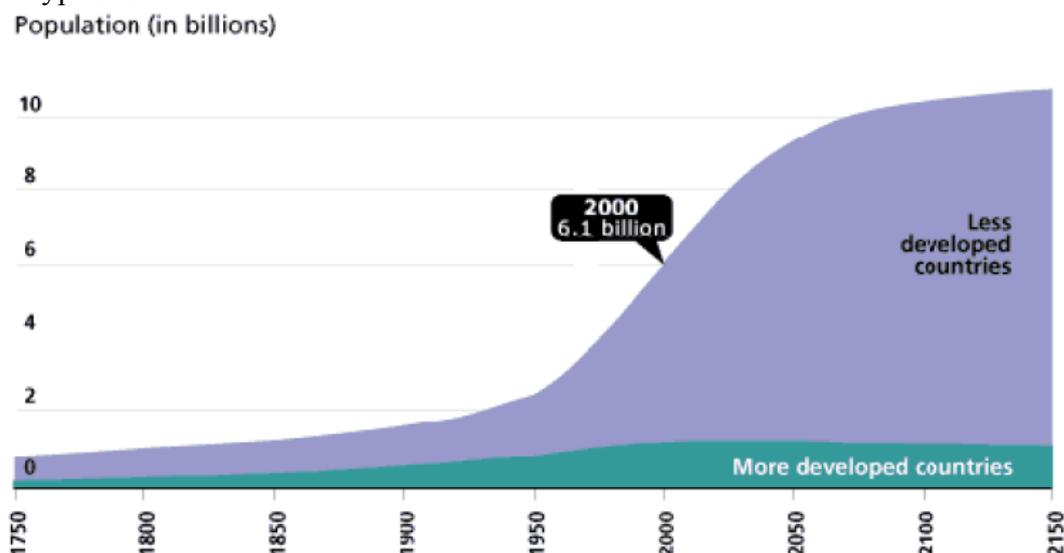
С учетом того, что среднестатистическая ежегодная суммарная продолжительность использования электроэнергии составляет 1000 часов, из приведенных на Рис. 1.33 данных легко можно установить электрическую мощность  $P_{PC}$ , приходящуюся на одного человека каждой из стран, присутствующих в поле рисунка. Как следует из такого рассмотрения, в странах «золотого миллиарда», к которым относится и Украина, указанная мощность принадлежит интервалу значений  $2 \leq P_{PC} \leq 16$  кВт в то время, как для большинства остальных стран (стран «третьего мира») с общей численностью населения около 5 млрд. человек  $P_{PC} \leq 0,5$  кВт.

На Рис. 1.34, *a*, *б* приведены диаграммы распределений численностей жителей планеты по состоянию на 2008 г., имеющих и не имеющих непосредственный доступ к электроэнергии (*a*), а также к современным видам топлива (*б*).



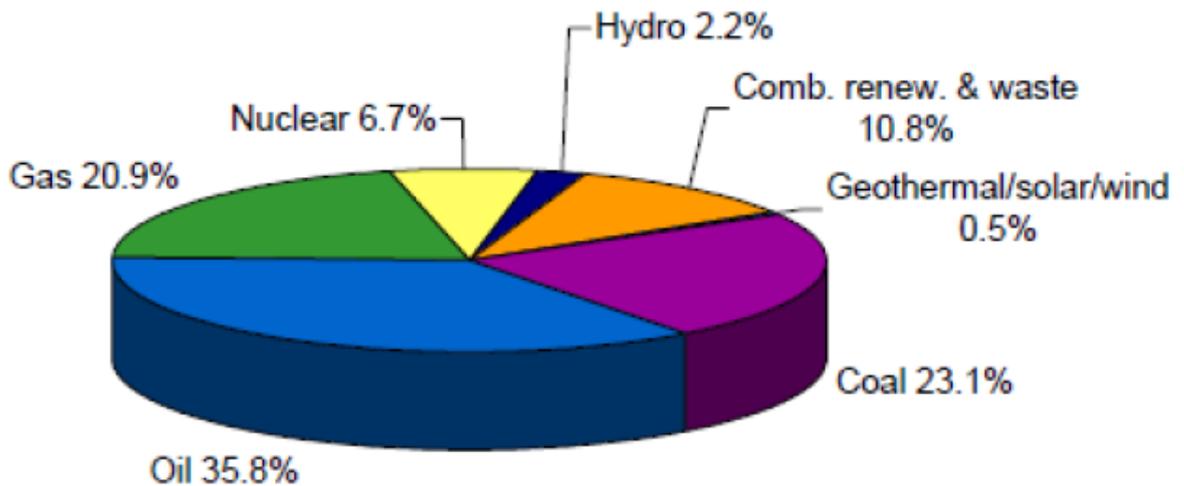
**Рисунок 1.34** - Диаграммы распределений численностей жителей планеты (в млрд. человек), имеющих и не имеющих непосредственный доступ к электроэнергии (*a*), а также к современным видам топлива (*б*)

Однако, не смотря на это, прежде всего быстрый прирост населения стран «третьего мира» в XXI веке, который приведет к увеличению численности жителей планеты до 10-11 млрд. человек (Рис. 1.35), наряду с ростом уровня потребления электроэнергии в развитых странах обусловит стремительный рост суммарного потребления электроэнергии к 2100 году, которое по различным оценкам потребует обеспечение вырабатываемой суммарной электрической мощности (Generated Total electrical power  $P_{GT}$ ) 50-100 ТВт. Указанная величина в 15-25 раз превосходит  $P_{GT}$  сегодняшнего уровня.

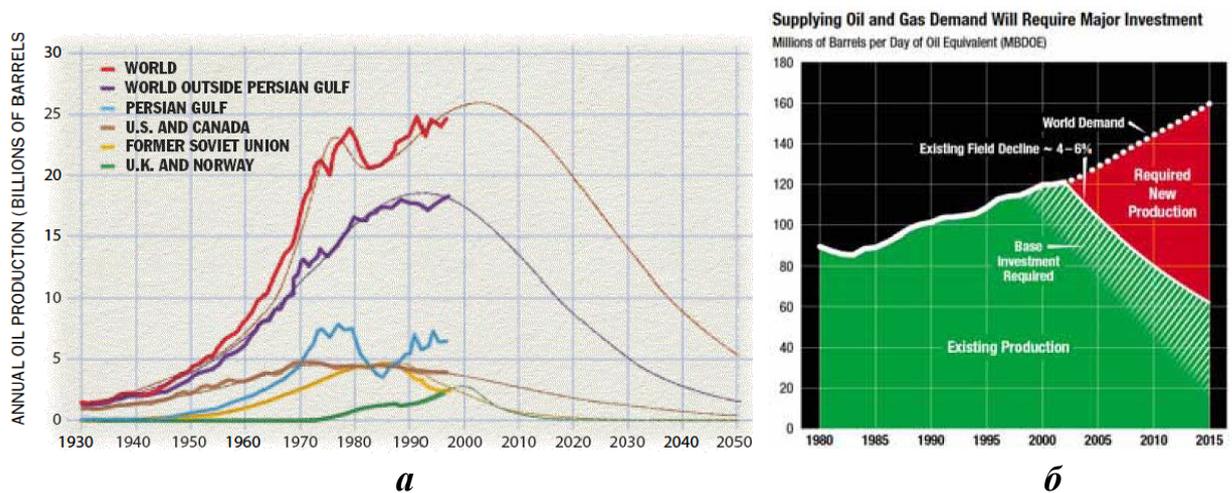


**Рисунок 1.35** – Изменение численности населения Земли (в млрд. человек) с 1750 года по 2150 год

В начале первой декады XXI века общемировая выработка суммарной электрической мощности  $P_{GT} \approx 4$  ТВт осуществлялась в основном (примерно на 87 %) за счет накопленных в земной коре запасов минеральных энергоресурсов – нефти, каменного угля, газа (сжигаемых на тепловых электростанциях – около 80 %), а также урана (обеспечивающего работу АЭС – около 7 %). Вклад солнечного электричества в этот мировой баланс был менее 0,5 %. Указанный расклад по состоянию на 2002 год иллюстрирует Рис. 1.36.



**Рисунок 1.36** – Диаграмма распределения вкладов различных видов энергоресурсов природного происхождения в общемировую выработку суммарной электрической мощности  $P_{GT} \approx 4$  ТВт по состоянию на 2002 год



**Рисунок 1.37** – Ежегодные объемы добычи нефти по годам в общемировом масштабе и в общемировом масштабе по некоторым регионам земного шара (*a*) и среднестатистические в общемировом масштабе по дням в течение каждого года (*б*): *a* – в млрд. баррелей (экстремальные кривые – результаты обобщающего анализа и прогноза); *б* – для нефти и газа – белая граница зеленого поля (в миллионах нефть-эквивалентных баррелей (ВОЕ)); белый пунктир – рост мировых потребностей в энергоресурсах с 2003 г. по 2015 г.; красное поле – область необходимой компенсации дефицита нефти и газа новыми источниками энергии

Однако, начиная примерно с 2003 года, ежегодный уровень общемировой добычи нефти начал заметно падать, что привело к росту дефицита в общемировом балансе энергоносителей, в частности, для производства требующейся во все больших количествах электрической энергии. Иллюстрация этих негативных тенденций приведена на Рис. 1.37.

Как видно из Рис. 1.37, *a*, к 2050 году запасы нефти будут практически исчерпаны. По оценкам ведущих экспертов аналогичная ситуация имеет место и в отношении природного газа, а также урана. Такую обобщенную ситуацию до 2015 года наглядно иллюстрирует красное поле на Рис. 1.37, *б*, откуда хорошо видно, что к 2015 году для компенсации дефицита в суммарной общемировой добыче нефти и газа **необходимо ежедневное пополнение** энергогенерирующих ресурсов **за счет новых источников** в объеме, эквивалентном **100 миллион баррелей нефти**. Это составляет примерно 80 % от общемирового объема ежедневной добычи нефти в настоящее время.

Таким образом, уже стартовавший и объективно обреченный на стремительное развитие дефицит ископаемых энергоресурсов, который к началу второй половины XXI века завершится их полным исчезновением (за исключением каменного угля), автоматически предопределяет острую необходимость в быстром росте объемов широкомасштабного использования солнечной энергии.

Вторым важнейшим ускорителем роста объемов широкомасштабного использования солнечной энергии является экологический фактор, который прежде всего связывается с насыщением атмосферы углекислым газом CO<sub>2</sub>, экранирующим нормальный теплообмен Земли с космическим пространством, что усугубляет развитие парникового эффекта и следовательно ускоряет чреватое губительными природными катаклизмами повышение среднегодовой температуры окружающей среды. Рост содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере Земли как раз и обусловлен в основном сжиганием нефти, каменного угля и газа.

Изменение содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере Земли с 1955 года по 2005 год в ppm (**p**articles **p**er **m**illion – число частиц примеси на миллион частиц фоновой среды; 1 ppm = 0,0001 % по составу) показано на Рис. 1.38.

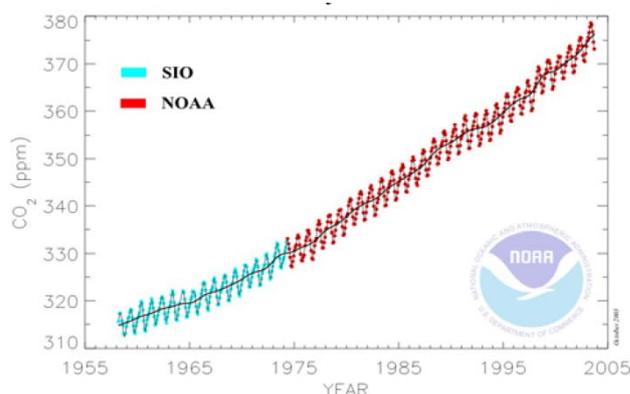


Рис. 1.38

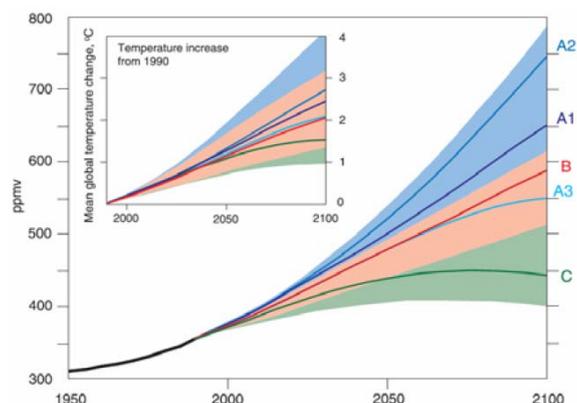


Рис. 1.39

На Рис. 1.39 показан прогноз дальнейшего развития этого процесса согласно различным сценариям (основное поле соответствующего графика) и связанного с ним повышения среднегодовой температуры окружающей среды по отношению к ее среднегодовой температуре в 1990 году (вставка на Рис. 1.39).

**Современные и разрабатываемые способы  
широкомасштабного обеспечения потребителей электроэнергией,  
вырабатываемой фотоэлектрическими солнечными батареями**

***Фотоэлектрические мощности и технологии ФЭП,  
необходимые для глобального энергообеспечения***

Сопоставление современных энергетических потребностей человечества по электричеству и различным топливным энергоносителям с их прогнозными оценками по состоянию к 2100 году без учета ограниченности ископаемых запасов нефти, газа и урана приведено в Таблице 1.7.

**Таблица 1.7** – Современные и прогнозируемые к 2100 году энергетические потребности человечества по электричеству и топливным энергоносителям

Энергетические потребности в мощностном эквиваленте, ТВт					
По электричеству и топливам		Только по электричеству		Только по топливам	
2006 г.	2100 г.	2006 г.	2100 г.	2006 г.	2100 г.
16	50-100	4	15-20	12	35-80

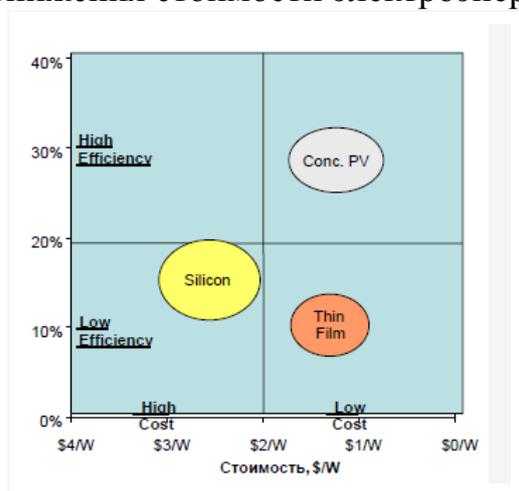
Вместе с тем, как было показано ранее (см., например, Рис. 1.37), уже к 2015 году из-за ограниченности ископаемых запасов нефти, газа и урана существенно возрастающий со временем дефицит их добычи придется компенсировать альтернативными энергоносителями, суммарный энергетический потенциал которых должен быть эквивалентен энерговыделению при сгорании примерно 80 % общемирового объема ежедневной добычи нефти в настоящее время. Наряду с отмеченным хорошо известно, что наиболее мощным, экологически чистым и неисчерпаемым альтернативным источником энергии сейчас и в обозримом будущем несомненно является солнечное излучение, оптимальным способом преобразования энергии которого в электрическую является фотоэлектрическое преобразование с помощью ФЭП и фотоэлектрических солнечных батарей на основе таких приборов. Поэтому очевидно, что приведенная в таблице 1.7 составляющая энергетических потребностей человечества к 2100 году по топливным энергоносителям в объеме 35-80 ТВт также практически полностью должна будет покрываться за счет фотоэлектрэнергетики.

Современные экспертные оценки показывают, что наиболее оптимистически обоснованная прогнозная динамика роста объемов промышленного производства ФЭП на основе кремния (монокристаллического, поликристаллического, аморфного), арсенида галлия и его модификаций в комбинации с некоторыми другими полупроводниковыми соединениями элементов III и V групп таблицы Менделеева, а также на основе поликристаллических пленок CIGS и CdTe вполне может обеспечить указанное выше требование. Обусловленное этой динамикой наращивание суммарной по всему миру мощности солнечных батарей  $P_{\text{ФСБС}}$  к 2020 году, к 2050 году и впоследствии через каждые 25 лет вплоть до 2100 года приведено в таблице 1.8 наряду с  $P_{\text{ГТ}}$  в 2010 году.

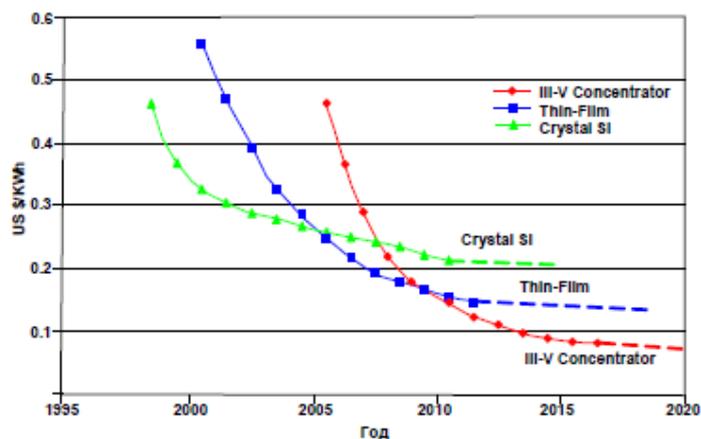
**Таблица 1.8** – Оптимистически прогнозируемая динамика наращивания в период с 2020 года по 2100 год суммарной по всему миру мощности изготовленных и установленных фотоэлектрических солнечных батарей

Год	2010	2020	2050	2075	2100
$P_{\text{ФСБС}}$ , ТВт	0,04	0,20	10	75	100

Прогнозная на 2012-2020 годы карта распределения технологий фотоэлектрических солнечных батарей по соотношению «КПД-стоимость» представлена на Рис. 1.40, *а*, а на Рис. 1.40, *б* показан прогноз на те же годы снижения стоимости электроэнергии, вырабатываемой этими ФСБ.



*а*



*б*

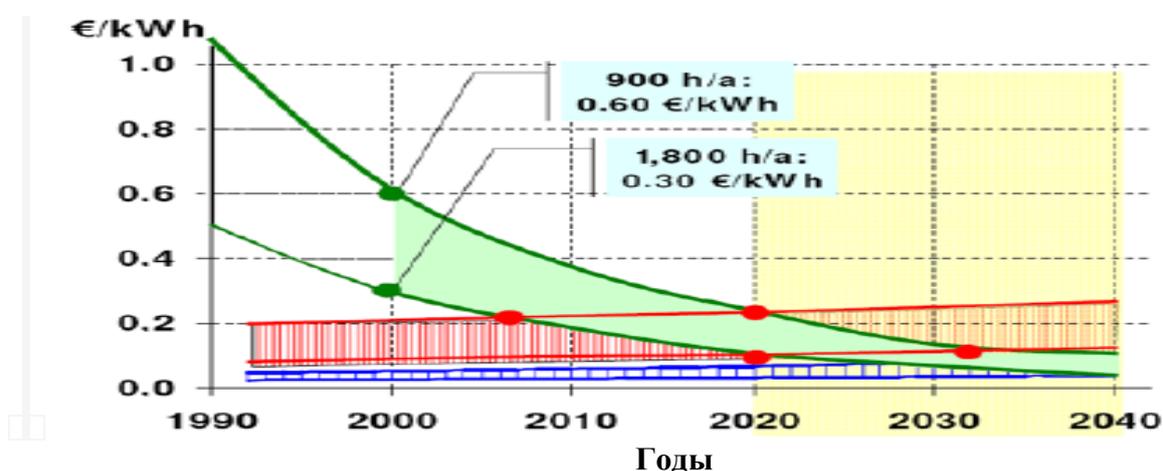
**Рисунок 1.40** – Прогноз на 2012-2020 годы: *а* - распределения технологий фотоэлектрических солнечных батарей по соотношению «КПД-стоимость» (“Silicon” – монокристаллические и поликристаллические кремниевые ФСБ, “Thin Film” – тонкопленочные ФСБ, “Conc. PV” – концентраторные ФСБ с каскадными ФЭП); *б* - снижения стоимости вырабатываемой этими ФСБ электроэнергии

Как следует из Рис. 1.40, наиболее выигрышными с точки зрения широкомасштабного наземного применения представляются концентраторные ФСБ с

каскадными ФЭП на основе GaAs и некоторых других полупроводниковых соединений из химических элементов III и V групп таблицы Менделеева. Действительно, присущий им темп снижения стоимости преобразования энергии солнечного излучения в электрическую (Рис. 1.40, б) должен способствовать более быстрому приближению стоимости солнечной фотоэлектрической энергии к стоимости электроэнергии, генерируемой тепловыми и атомными электростанциями. Однако, если ориентироваться только на стоимостный показатель, то можно допустить серьезный просчет относительно дальней перспективы после 2050 года. Как показывают экспертные оценки, из-за значительно меньшего содержания галлия в земной коре - около  $1,5 \cdot 10^{-3} \%$  - по сравнению, например, с кремнием – около 29 % - даже при эксплуатации ФЭП на основе GaAs в условиях ВКСИ ограниченные запасы галлия не позволят произвести ФСБ с GaAs для обеспечения суммарной пиковой мощности более 10 ТВт. Так, например, в США ориентировочно к 2030 году планируется израсходовать до 13 % указанного ресурса.

Вместе с тем, именно стоимость солнечной фотоэлектрической энергии для наземного применения по сравнению с вырабатываемой традиционными способами определяет уровень коммерческого интереса к ней сейчас и будет предопределять его в дальнейшем вплоть до критического обвала ресурса традиционных наиболее удобных для применения энергоносителей.

На Рис. 1.41 **зелеными кривыми** показана динамика диапазона изменения стоимости солнечной фотоэлектрической энергии в Европе за последние 20 лет и прогнозируемая на последующие 30 лет в зависимости от географии применения ФСБ. Верхняя зеленая кривая соответствует широтам северной части Германии, где годовая длительность солнечного сияния, наиболее эффективного для фотоэлектрического преобразования, составляет около 900 часов. Нижняя зеленая кривая соответствует широтам Испании, где годовая длительность солнечного сияния, наиболее эффективного для фотоэлектрического преобразования, составляет около 1800 часов. Светло-зеленая полоса, ограниченная этими кривыми, соответствует всем промежуточным географическим широтам.



**Рисунок 1.41** - Динамика изменения стоимости электроэнергии наземного применения, вырабатываемой ФСБ и традиционными способами

**Синяя полоса** на Рис. 1.41 показывает динамику изменения диапазона стоимости электроэнергии, непрерывно вырабатываемой традиционными способами для сетевых потребителей. **Красная полоса** на этом же рисунке иллюстрирует динамику изменения диапазона стоимости электроэнергии, вырабатываемой традиционными способами для сетевых потребителей, но в

**условиях пиковых нагрузок** на электросети (например, при массовом включении кондиционеров в летнее время и электронагревателей различных типов в холодное время года).

Как легко видеть из сопоставления графиков, приведенных на Рис. 1.41 и на Рис. 1.40, **б**, в настоящее время достигнуто примерное выравнивание стоимости солнечной фотоэлектрической энергии, продуцируемой на широтах Испании пленочными и концентраторными каскадными ФСБ, со стоимостью электроэнергии, вырабатываемой традиционными способами для сетевых потребителей в условиях пиковых нагрузок. На широтах северной части Германии аналогичной ситуации удастся достичь в период с 2020 года по 2030 год. Выход на равенство стоимости солнечной фотоэлектрической энергии со стоимостью электроэнергии, непрерывно вырабатываемой традиционными способами для сетевых потребителей, ожидается к 2025 году на широтах Испании и к 2035 году на широтах северной части Германии.

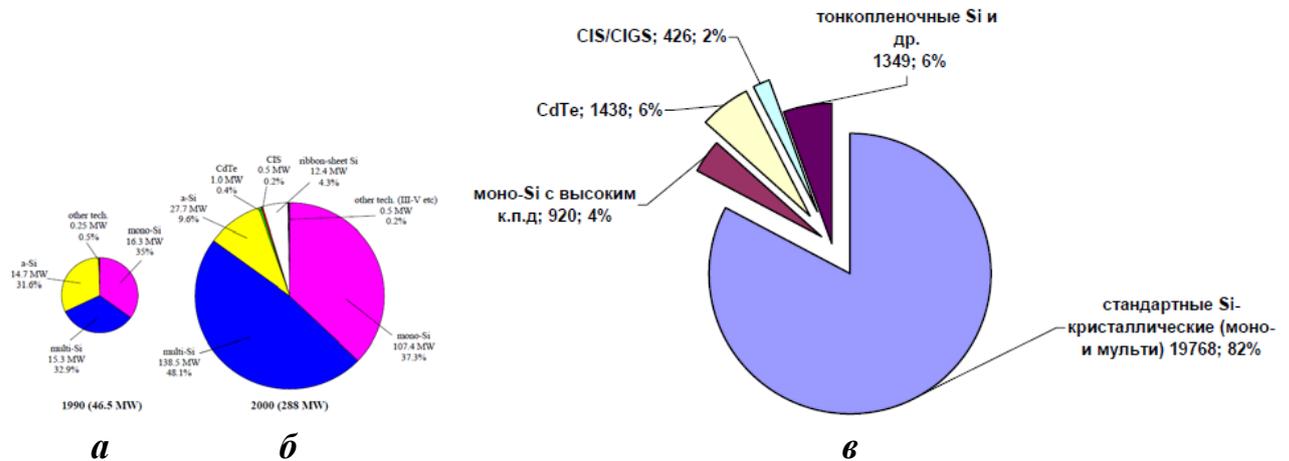
Из ранее изложенного следует, что до 2050 года указанные выше перспективы в принципе возможно осуществить только лишь за счет концентраторных каскадных ФСБ. Однако они требуют использования электромеханических двухосных систем автоматического слежения за солнцем в течение всего светового дня – так называемых трекеров – достаточно громоздких в случае больших панелей с ФСБ, а также нуждающихся в ежедневном надзоре и регулярном техническом обслуживании. Это естественно снижает универсальность и надежность работы концентраторных каскадных ФСБ, в связи с чем там, где это возможно и рационально, вместо них наряду с кремниевыми ФСБ широко используют ФСБ на основе указывавшихся ранее пленочных полупроводниковых слоев, эффективно работающих в условиях обычного солнечного излучения и также обеспечивающих более дешевую электроэнергию по сравнению с кристаллическими кремниевыми.

Однако предельная суммарная пиковая мощность, которую могут обеспечить ФСБ на основе пленочных слоев CIGS и CdTe намного меньше, чем в случае концентраторных каскадных ФСБ с Ga, поскольку содержание Se, Cd, In, Te земной коре примерно на 2-3 порядка ниже по сравнению с Ga и составляет соответственно  $6 \cdot 10^{-5} \%$ ,  $1,4 \cdot 10^{-5} \%$ ,  $10^{-5} \%$ ,  $10^{-6} \%$ . Поэтому согласно экспертным оценкам предельная суммарная пиковая мощность, которую могут обеспечить ФСБ на основе пленочных слоев **CIGS**, не превосходит **0,24 ТВт**, а в случае базовых пленочных слоев **CdTe** – **0,43 ТВт**, что **в целом** дает **около 0,7 ТВт**. Такая итоговая величина предельной суммарной пиковой мощности ФСБ на основе пленочных слоев CIGS и CdTe свидетельствует о том, что в случае реализации **всемирной наземной фотоэлектроэнергетической программы (ВНФП)** только лишь за счет этих ФСБ соответствующий ресурс был бы исчерпан ориентировочно уже к 2030 году.

Из всего изложенного выше следует, что после 2050 года дальнейшая реализация ВНФП согласно прогнозным оценкам, приведенным в таблице 1.8, возможна лишь за счет соответствующей кремниевой

технологии если к тому времени еще не сложится более эффективная альтернативная промышленная технология (например, основанная на применении органических полупроводниковых пленочных материалов).

С другой стороны, следует заметить, что перспективы ВНФП до 2050 года, связываемые с преимуществом в стоимости электроэнергии, вырабатываемой ФСБ, изготавливаемых по не кремниевой технологии, пока еще не подкреплены уровнем соответствующих производственных мощностей, адекватное развитие которых требует значительных материальных и временных ресурсов. Эта проблема ощущается при сопоставлении объемов мирового производства ФСБ рассматриваемых типов в 1990-2010 годах, которые приведены на Рис. 1.42.



**Рисунок 1.42** – Объемы мирового производства фотоэлектрических солнечных батарей (в % и в МВт пиковой мощности) с ФЭП, изготавливаемыми согласно различным технологиям: *а* – в 1990 году; *б* – в 2000 году; *в* – в 2010 году

### Оценочные значения минимальной суммарной площади $S_{\text{ФСБС}}$ фотоприемной поверхности ФСБ в зависимости от их типа и назначения

В основу соответствующих оценочных расчетов можно положить:

- 1) результаты приведенного на Рис. 1.40, *а* прогноза распределения технологий ФСБ по соотношению «КПД-стоимость»;
- 2) значения  $P_{\text{и}}^*$ , используемые при подобных оценках для ФСБ, работающих без трекеров в условиях обычного наземного солнечного излучения ( $850 \text{ Вт/м}^2$ ), и для концентраторных ФСБ наземного применения с трекерами ( $1000 \text{ Вт/м}^2$ ).

При этом для оценочных расчетов  $S_{\text{ФСБС}}$  можно воспользоваться формулой (1.5) в следующем модифицированном виде

$$\eta = [P_{\text{ФСБС}} / (P_{\text{и}}^* S_{\text{ФСБС}})] \cdot 100 \%, \quad (1.24)$$

откуда

$$S_{\text{ФСБС}} = [P_{\text{ФСБС}} / (P_{\text{и}}^* \eta)] \cdot 100 \%, \quad (1.25)$$

Рассчитанные по формуле (1.25) с учетом приведенных выше исходных параметров оценочные значения  $S_{\text{ФСБ}}$  в случаях  $P_{\text{ФСБ}} = 1$  кВт (пример ФСБ для автономных потребителей) и  $0,04 \leq P_{\text{ФСБ}} \leq 100$  ТВт (значения из таблицы 1.8, соответствующие максимально возможным объемам по мощностям ФСБ реальным к концу 2010 года и прогнозируемым на период с 2020 года по 2100 год) приведены в таблице 1.9: обычным шрифтом – в  $\text{м}^2$  для  $P_{\text{ФСБ}} = 1$  кВт; красным шрифтом – в  $\text{км}^2$  для  $0,04 \leq P_{\text{ФСБ}} \leq 100$  ТВт. Оценочные значения размеров  $l_{\text{ФСБ}}$  сторон квадратов с площадями, соответствующими  $S_{\text{ФСБ}}$  из таблицы 1.9, приведены в таблице 1.10.

**Таблица 1.9** - Оценочные значения минимальной суммарной площади фотоприемной поверхности ФСБ наземного применения в зависимости от их типа и назначения (наименования типов ФСБ заимствовано из Рис. 1.40 и подписей к нему; желтым маркером выделены значения  $S_{\text{ФСБ}}$ , которые нереальны из-за дефицита критериальных химических элементов для соответствующих типов ФСБ)

Тип ФСБ	$P_{\text{и}}^*$ , Вт/ $\text{м}^2$	КПД, %	Пиковая электрическая мощность					
			$P_{\text{ФСБ}}$ , кВт, ТВт (ниже: $S_{\text{ФСБ}}$ , $\text{м}^2$ , $10^3 \text{ км}^2$ )					
			1,00	0,04	0,20	10	75	100
Thin Film	850	10	12	0,480	2,40	120	900	1200
Silicon	850	15	7,8	0,312	1,56	78	585	780
	850	20	6	0,240	1,20	60	450	600
Conc. PV	1000	25	4	0,160	0,80	40	300	400
	1000	30	3,3	0,132	0,66	33	248	330

**Таблица 1.10** - Оценочные значения размеров  $l_{\text{ФСБ}}$  сторон квадратов с площадями, соответствующими  $S_{\text{ФСБ}}$  из таблицы 1.9

Тип ФСБ	$P_{\text{и}}^*$ , Вт/ $\text{м}^2$	КПД, %	Пиковая электрическая мощность					
			$P_{\text{ФСБ}}$ , кВт, ТВт (ниже: $l_{\text{ФСБ}}$ , м, км)					
			1,00	0,04	0,20	10	75	100
Thin Film	850	10	3,5	21,9	49	346,4	948,7	1095
Silicon	850	15	2,8	17,6	39,5	279,3	764,9	883,2
	850	20	2,5	15,5	34,6	244,9	670,8	774,6
Conc. PV	1000	25	2,0	12,6	28,3	200	547,7	632,5
	1000	30	1,8	11,5	25,7	181,7	498	574,5