



Институт физики, нанотехнологий и  
телекоммуникаций СПбГПУ

Владимир Юрьевич Сергеев

проф., д.ф.м.н., кафедра физики плазмы

## Доклад 2

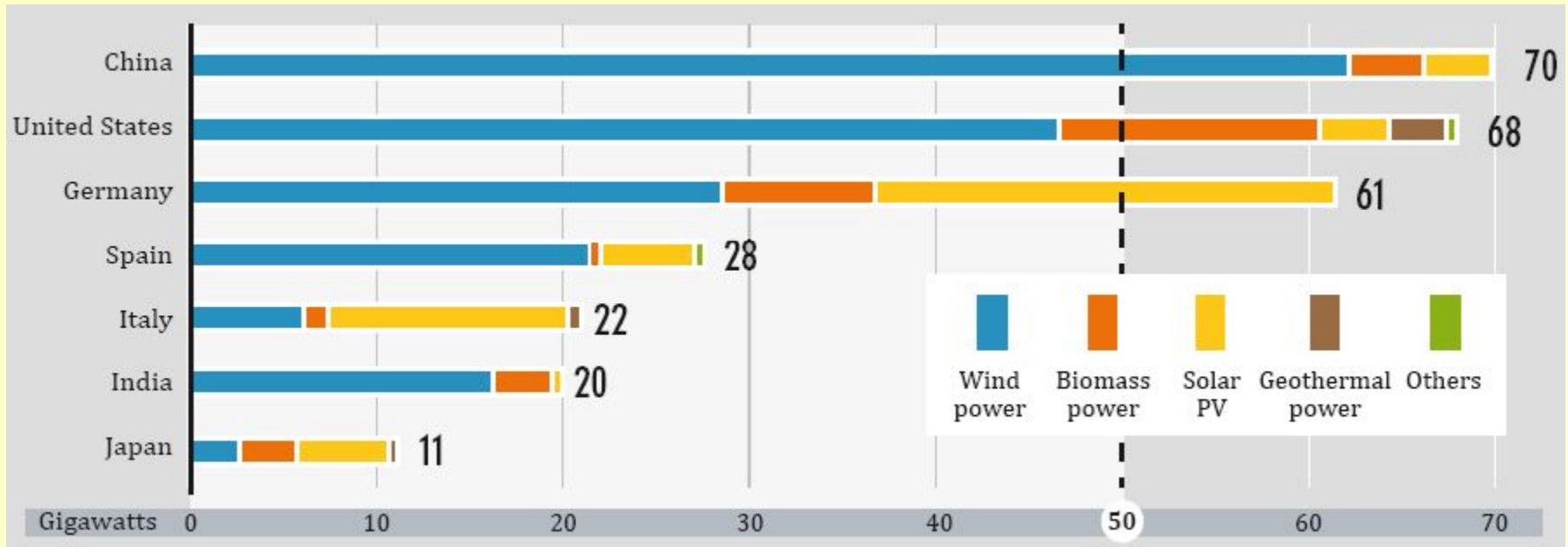
# Альтернативные источники энергии

# План

1. Состояние альтернативных источников в мировой энергетике
2. Энергия ветра
3. Биоэнергия
4. Энергия Солнца
5. Геотермальная энергия
6. Энергия океана
7. Пример: Альтернативная энергетика в Германии
8. Дополнительная информация

1. Состояние альтернативных источников в мировой энергетике
2. Энергия ветра
3. Биоэнергия
4. Энергия Солнца
5. Геотермальная энергия
6. Энергия океана
7. Пример: Альтернативная энергетика в Германии
8. Дополнительная информация

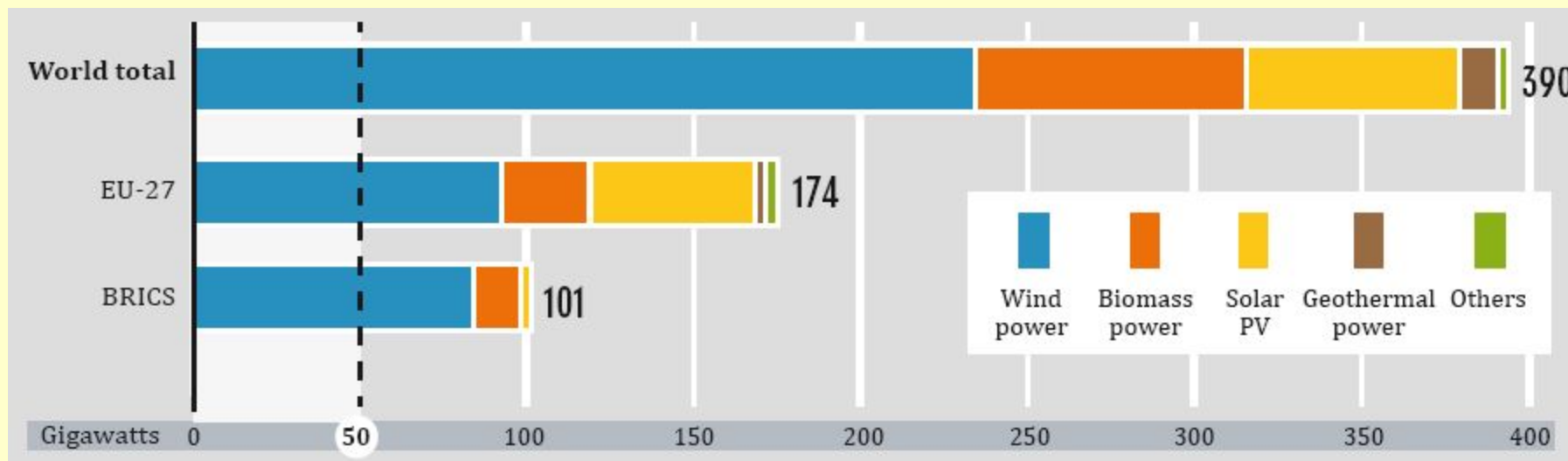
# Альтернативные источники по странам



- Основные потребители альтернативной энергии – страны ЕС, страны BRICS, США и Япония.
- Основной источник альтернативной энергии в большинстве стран – ветер.
- В Германии сильно развита и солнечная энергетика. Удельная выработка самая большая в мире. Альтернативная энергетика Германии будет подробнее рассмотрена в конце лекции.

Renewables global status report 2012; <http://www.map.ren21.net/GSR/GSR2012.pdf>

# Вклад альтернативных источников в мировое энергопотребление



- Рейтинг альтернативных источников: I – ветер, II – биомасса, III – солнце, IV – геотермальная энергия, V – энергия океана и т.д.
- Из прошлой лекции: среднемировое потребление – 2.2 кВт, население Земли 7 млрд. человек => мировое потребление 15.4 ТВт. То есть за счет возобновляемых ресурсов (не считая ГЭС) производится ~2.5% энергии.

Renewables global status report 2012; <http://www.map.ren21.net/GSR/GSR2012.pdf>

# Параметры электростановок

Источник	Мощность, МВт	Кап. влож. тыс.\$/кВт	Себес-ть энергии,\$ /кВт·ч	Окупаемость, лет при продаже за 0.2\$/кВт·ч (*- при дотациях 50%)
Ветер (суша)	1.5-3.5	1.5-2.5	<b>0.05-0.17</b>	<b>2.5</b>
Ветер (море)	1.5-7.5	4-6	<b>0.11-0.22</b>	<b>14</b>
Биомасса	25-100	3-4.5	<b>0.08-0.18</b>	<b>6</b>
Фотоэлектр.	2.5-100	2-2.5	<b>0.20-0.37</b>	$\infty$ (7.5*)
Солн. тепло	50-500	6.5-10.5	<b>0.19-0.29</b>	$\infty$ (12*)
Гидротермы	1-100	2-6	<b>0.06-0.11</b>	<b>4</b>
Приливы	1-250	5-6	<b>0.21-0.28</b>	$\infty$ (8*)
ГЭС	1 – 1000	1-4	<b>0.05-0.10</b>	<b>2.5</b>

- Самая развитая технология – ГЭС – пока остается и самой выгодной. Но и альтернативные методики выглядят разумно.
- В цену входит не только себестоимость, но и государственные субсидии

Renewables global status report 2012; <http://www.map.ren21.net/GSR/GSR2012.pdf>

1. Состояние альтернативных источников в мировой энергетике
2. Энергия ветра
3. Биоэнергия
4. Энергия Солнца
5. Геотермальная энергия
6. Энергия океана
7. Пример: Альтернативная энергетика в Германии
8. Дополнительная информация



# Происхождение ветра

Причина ветра – неравномерный нагрев земной поверхности.

Например, на побережьях морей возникают **бризы** (см. рис.), распространяющиеся до 50 км в сторону моря и суши в условиях слабого переноса воздуха (тропики, субтропики). Они имеют суточную периодичность. В России – летом у берегов Черного и Каспийского морей.



Годовые изменения температуры по берегам океанов приводят к стабильным по сезонам областям высокого и низкого давления и вызывают **муссоны**. В основном также в тропиках, но бывают и в других местностях. В России – на Дальнем Востоке, а также на части побережья Северного Ледовитого океана.

**Вращение Земли** также вызывает отклонения воздушных течений.

Все эти причины осложняют общую циркуляцию атмосферы. Возникает ряд отдельных циркуляций, в той или иной степени связанных друг с другом.

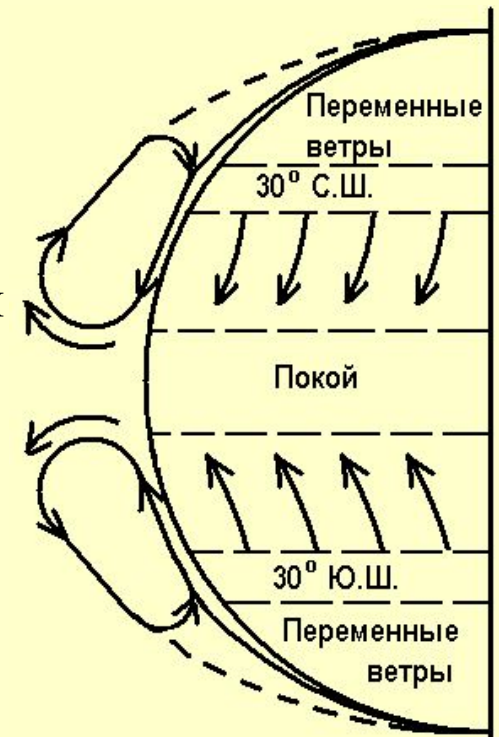
# Общая циркуляция земной атмосферы

На экваторе у земли лежит **зона затишья** со слабыми переменными ветрами. Поток воздуха восходящий.

На север и на юг от нее расположены **зоны пассатов** (6-8 м/с у поверхности Земли), которые из-за вращения Земли отклонены к западу (сила Кориолиса). Поэтому в северном полушарии постоянные ветры приходят с северо-востока, в южном с юго-востока.

Пассаты простираются примерно до  $30^\circ$  северной и южной широт и отличаются равномерностью воздушных течений по направлению и скорости. Вблизи больших континентов они нарушаются сильными годовыми колебаниями температуры и давления над материками.

В субтропических широтах зоны пассатов сменяются штилевыми областями. К северу и югу от этих областей дуют переменные ветры между западным и юго-западным направлениями в северном полушарии и между западным и северо-западным в южном. В этих широтах, кроме того, в атмосфере непрерывно возникают вихревые движения, усложняющие схему циркуляции атмосферы.



# Ветровые зоны России



Зоны со среднегодовыми скоростями ветра:

- 1 - выше 6 м/сек;
- 2 - от 3,5 до 6 м/сек;
- 3 - до 3,5 м/сек.

*Значение среднегодовой скорости ветра в данном районе дает возможность приблизительно судить об эффективности использования ветродвигателя.*

Прибрежные зоны – высокая интенсивность ветров. Среднегодовые скорости ветра  $>6$  м/с. На Севере и Сахалине наблюдаются ураганные ветры ( $>30$  м/с). Поэтому там можно использовать только агрегаты с ветродвигателями высокой быстроходности и прочности. В Арктике и на «дальнем» побережье эффективно применение ветроэлектрических станций, работающих совместно с тепловыми.

Юг европейской части России, Урал, юг Сибири – средняя интенсивность ветра. Среднегодовая скорость ветра – 3,5-6 м/с. Возможное применение ВЭС.

Север европейской части России, север Сибири (исключая побережье) – скорости ветра  $<3,5$  м/с. Широкое применение ветроустановок экономически не оправдано.

# Ветра в Ленинградской области

**Зима** – наиболее сильные ветры над Ладогой, на ее побережье они слабее. Кроме того, сильны ветра над южным побережьем Финского залива.

**Весна и лето** – узкая полоса сильных ветров между южным побережьем Финского залива и о.Котлин.

**Осень** – интенсивная атмосферная циркуляция на всей территории региона.

Наиболее перспективное направление развития – Кронштадт.

Получение мощности с материка требует строительства подводной ЛЭП! С другой стороны, через остров проходит путь миграции птиц!

Анализ графиков изменения скорости ветра в Кронштадте показывает, что ВЭС может производить выработку электроэнергии от 40 до 70 % времени каждого месяца в течении года. Выработка энергии в часы пик составляет 50-70 % месячной выработки.



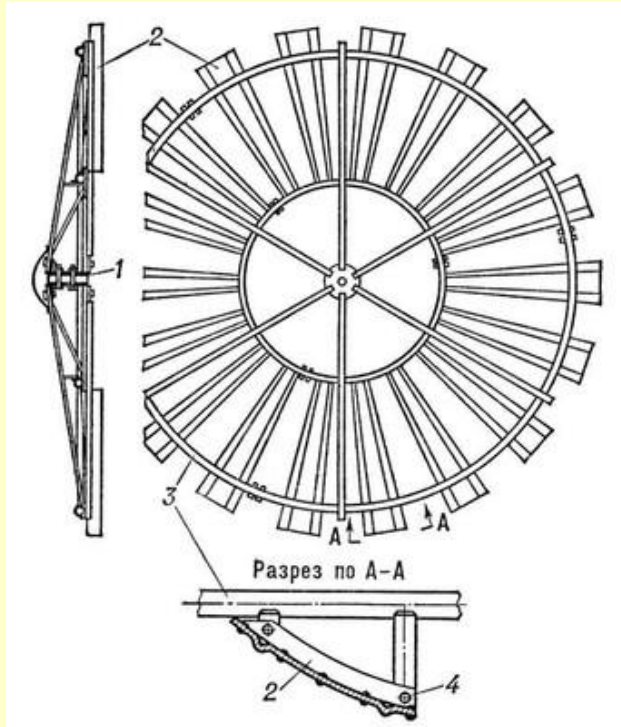
*Изолинии распределения средних скоростей ветра по территории Ленинградской области, м/с*

# Использование ветроэлектростанций

## Классификация ветродвигателей

### Крыльчатые

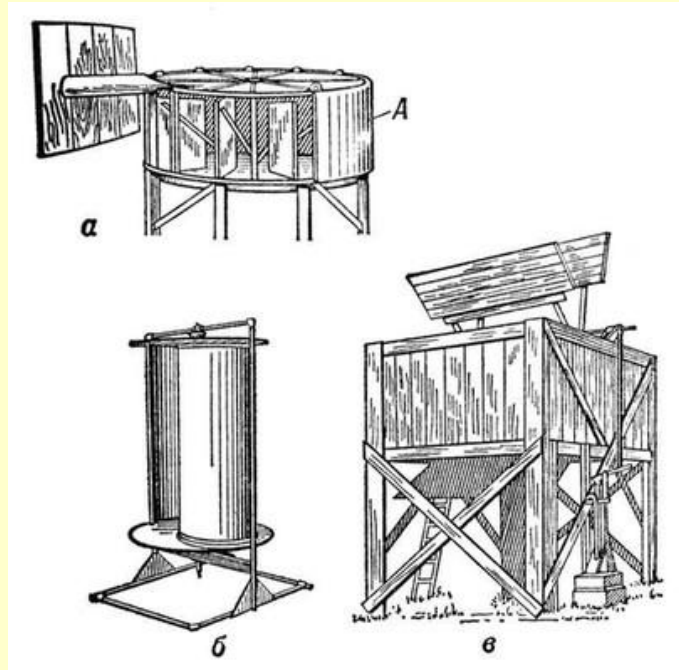
Ветровое колесо располагается в вертикальной плоскости; плоскость вращения перпендикулярна направлению ветра



### Вертикальные

Ветровое колесо имеет вертикальную ось вращения

- Карусельные (а)
- Роторные Савониуса (б)



### Барабанные

Ветровое колесо вертикально, ось вращения горизонтальна, перпендикулярна направлению ветра (в)



# Типы ветродвигателей

**Быстроходность** – отношение скорости конца лопасти к скорости ветра:  $Z = \omega R/V$

По этому параметру крыльчатые ветродвигатели делятся на многолопастные тихоходные ( $Z \leq 2$ ), малолопастные тихоходные ( $Z > 2$ ), малолопастные быстроходные ( $Z > 3$ ).

## Преимущества и недостатки разных типов ветродвигателей

Все ветродвигатели, кроме роторных, требуют ориентации самого двигателя или его ширмы по ветру. У вертикальных и барабанных ветродвигателей: а) ветровая нагрузка действует на лопасти поочерёдно => использование энергии ветра мало; б) размеры используемой части потока малы по сравнению с колесом => растет вес установки.



В настоящее время наиболее широко используются малолопастные крыльчатые и роторные ветродвигатели



# Работа поверхности под действием ветра

**Скорость ветра  $V$**  – расстояние в метрах, проходимое воздухом в течение одной секунды. Масса воздуха, протекающая через поперечное сечение  $A$  со скоростью  $V$ :  $m = \rho AV$

Тогда мощность будет составлять (без учета КПД):  $P = 0.5 \rho AV^3$

Под действием ветра поверхность движется со скоростью  $U$

Отношение работы, развиваемой движущейся поверхностью, к энергии ветрового потока, имеющего поперечное сечение  $A$ , равное этой поверхности:

$$\xi = C_x \left(1 - \frac{U}{V}\right)^2 \frac{U}{V}$$

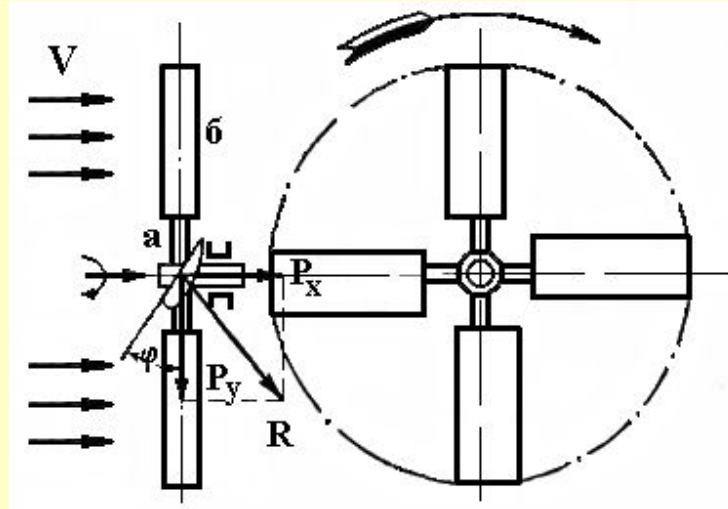
Здесь  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления,  $\xi$  – коэффициент использования энергии ветра, зависит от скорости  $U$  перемещения поверхности в направлении ветра. При  $U=0$  и  $U=V$  скорость ветра не используется!!!

Для получения максимального  $\xi$  необходимо  $U=V/3$  (что соответствует  $\xi=0.192$ ).

В случае реального ветроколеса задача сложнее, необходимо учитывать **вращение** и **наклон** плоскости лопастей в результате значения  $\xi$  возрастают.

# Работа ветрового колеса

Крыльчатые ветроколеса работают за счёт косого удара при движении лопастей перпендикулярно к направлению скорости ветра.



Крыло состоит из маха  $a$  и лопасти  $b$ , образующей с плоскостью вращения угол  $\varphi$  – угол заклинивания лопасти.

Набегающий воздушный поток действует с силой  $R$ , раскладываемой на  $P_x$  – лобовое давление ветра, и  $P_y$ , создающей крутящий момент.

Так как круговая скорость элемента лопасти возрастает по мере удаления от оси, то при постоянном  $\varphi$  интегральное использование энергии ветра не будет оптимальным. Оптимизация – угол  $\varphi$  уменьшается с ростом расстояния от оси.

У оптимизированных ветродвигателей коэффициент использования энергии ветра с учетом потерь  $\xi_{max\_real} \approx 0.35-0.40$ .



# Простейшая оценка мощности

Из приведенных выше выражений ясно, что мощность можно оценить по формуле:  $P = 0.5 \xi \rho A V^3$

Видно, что чем больше ометаемая площадь – тем больше мощность.

Скорость ветра растет – мощность растет кубически!

Жаль, что нельзя увеличить плотность воздуха :)

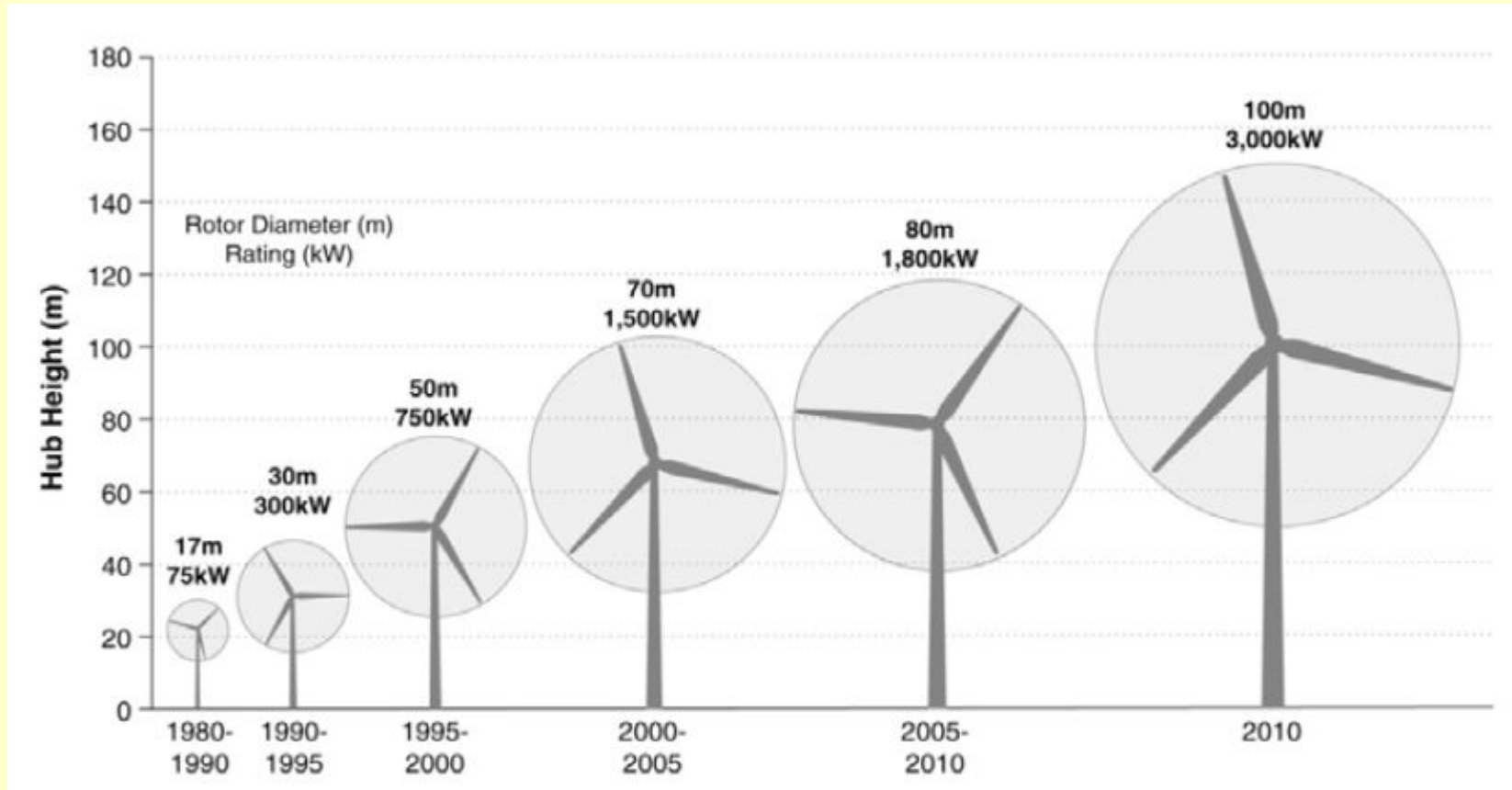
Можно сделать простую оценку: диаметр  $100 \text{ м}$  – стандарт для современного ветряка, скорость ветра  $7 \text{ м/с}$  (Кронштадт), плотность воздуха  $1.3 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент использования положим  $0.4$ .

$$P = 0.5 \times 0.4 \times 1.3 \times \pi \times 50^2 \times 7^3 = 700 \text{ кВт}$$

На побережье Голландии, Германии, Дании средняя скорость ветра –  $7-8.5 \text{ м/с}$ , на склонах холмов –  $10-11.5 \text{ м/с}$ . Мощность ветряка диаметром 100 метров при этом будет превышать  $3.1 \text{ МВт}$ !

Современный крупный ветряк – Enercon E-126 (Германия) – диаметр  $127 \text{ м}$ , мощность до  $7.5 \text{ МВт}$ , стоимость 11 млн €. За 2010-2012 установлено 147 шт.

# Экономические характеристики



- Экономически более выгодно строить большие ветряки (мощность пропорциональна ометаемой площади).
- По прогнозу, в ближайшие годы себестоимость ветроэлектричества будет снижаться на 1-5% в год (большой разброс предсказаний!).

US National Renewable Energy Laboratory, <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/54526.pdf>

# Проблемы и перспективы

## Основные проблемы и методы их решения

**Звук:** На уровне оси ветроколеса у ВЭС мощностью 850 кВт уровень шума – 104 дБ. Необходимо относить ВЭС на 300 м от жилья – шум снижается до 42-45 дБ (улица средней оживленности). Невозможно устроить пастбище – снижаются удои молока!

**Инфразвук:** ВЭС генерируют звуковые волны частотой 6-7 Гц. Современные модели ветряков излучают инфразвук силой менее 60 дБ – ниже установленного СНиП.

**Птицы:** Попадание птиц под вращающиеся лопасти (Заметим, потери птиц на ЛЭП в сотни раз больше).

**Климат:** энергия ветра передается лопастям => ухудшается вентиляция местности.

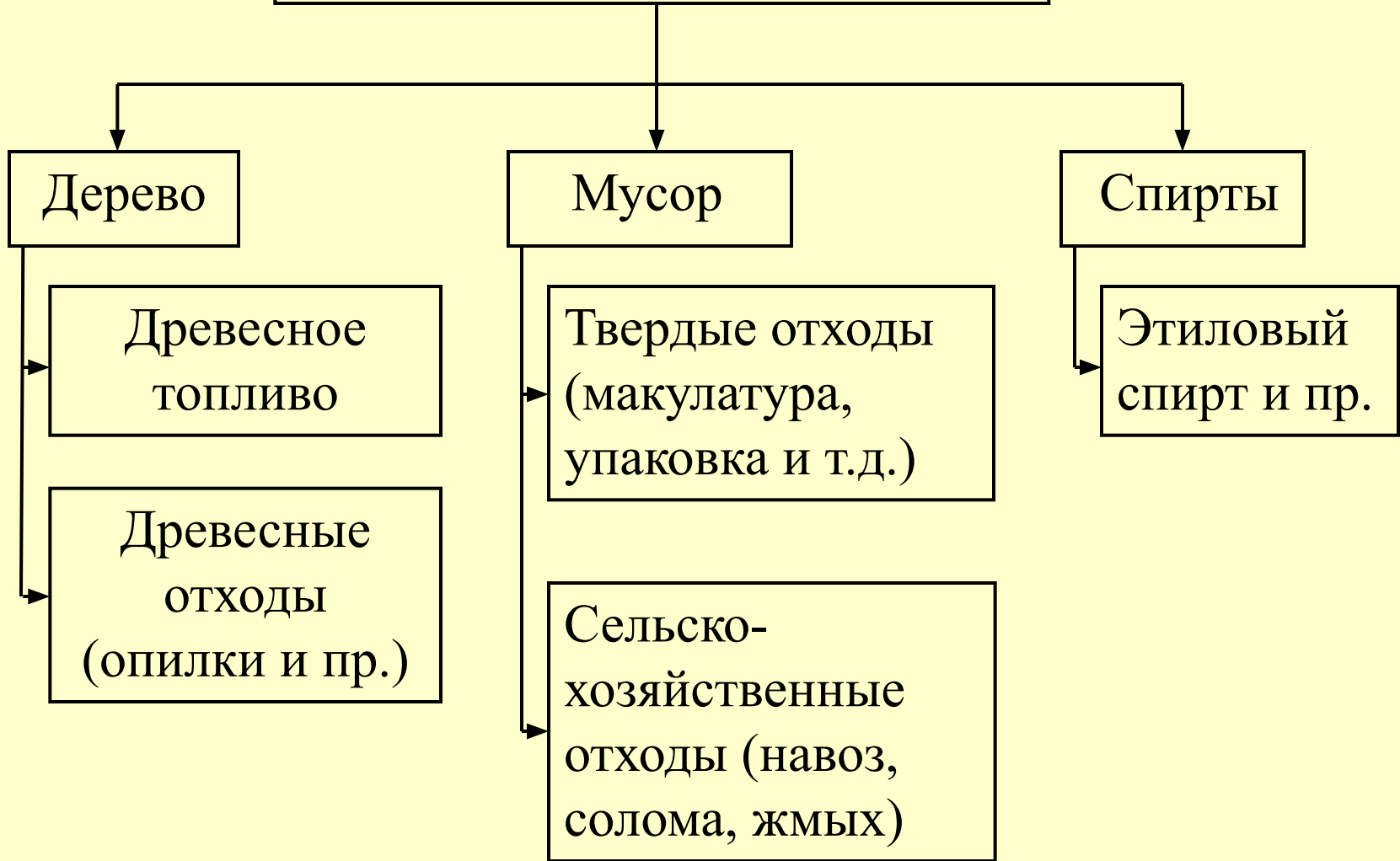
**Законодательство:** В Европе и США ВЭС – дотируемое направление, уже выходящее на самоокупаемость. В России нет ни дотаций, ни правил закупки излишков энергии ВЭС.

## Перспективные направления

- Дешевые ВЭС малой мощности с буферными батареями для локальных потребителей
- Эксплуатация ветряков больших размеров (диаметр ротора >100 м) мощностью >3 МВт
- Оптимизация расположения по ветровым зонам (север и восток России значительно более выгодны, чем Европа => быстрая окупаемость).

1. Состояние альтернативных источников в мировой энергетике
2. Энергия ветра
3. **Биоэнергия**
4. Энергия Солнца
5. Геотермальная энергия
6. Энергия океана
7. Пример: Альтернативная энергетика в Германии
8. Дополнительная информация

# Виды биотоплива



# Древесина - первое биотопливо

- До середины XIX в. древесина – основной источник энергии
- Даже в индустриально развитых странах древесина все еще используется как источник энергии
- Применяется в основном на деревообрабатывающих производствах для получения пара и электричества, дополнительная экономия за счет уничтожения (вместо вывоза) отходов производства

Топливные гранулы (пеллеты) – результат прессования при высокой температуре отходов производства: древесные опилки, стружка, кора, сучки, ветки и т.д.

Технология разработана в России в 1830-х годах А.П. Вешняковым первоначально для использования отходов древесного и каменного угля.



*Древесные гранулы*

Теплота сгорания 1 кг гранул = 1.6 кг дров. Зольность ~1% (дрова – 20%).

# Биогаз

1. Мусор как топливо для небольшой ТЭС ~10 МВт.
2. Оборудование свалок системой сбора метана.

При гниении бытовых отходов выделяется биогаз (метан).

В заполненной свалке перед герметизацией устанавливается система сбора метана.

Метан используется как топливо для ТЭС.

Минус – медленное гниение в герметизированном пространстве, большая часть отходов мумифицируется, а не разлагается.



Более выгодна разработка специальных биореакторов

# Использование биореакторов

Биореактор – устройство для получения энергоносителей из индустриальных и сельскохозяйственных отходов и биомассы сельскохозяйственных растений.

Наиболее распространенный тип биореактора – метантенк (вещество сбраживается без доступа воздуха при подогреве до 30-50°C, на выходе – биогаз: ~65% метана, ~30% углекислого газа).

## Статистическая информация

**Китай**: с 1970-х годов строится 1 млн метантенков в год. 2000 г – 30 млн метантенков используют  $10^9$  т отходов  $\Rightarrow 5 \cdot 10^{11}$  м<sup>3</sup> метана в год – обеспечивает 30% потребности газа.

**Индия**: 1930-е г – принятие первой в мире программы использования биогаза. 1 млн метантенков производит более  $10^9$  м<sup>3</sup> метана в год. Государство субсидирует их установку.

**США**: на биогаз перерабатывается 372 млн т отходов в год с получением  $1.5 \cdot 10^{11}$  м<sup>3</sup> метана, что обеспечивает 1.9% потребления газа.

**Англия**: с 1990 г биогаз покрывает все энергозатраты в сельском хозяйстве.

**Германия**: основное направление – производство газа для работы небольших ТЭС. На 2010 год 5905 установок производят 2.3 ГВт электрической мощности (12.6% от всего производства за счет возобновляемых ресурсов).



# Экономическое обоснование

В навозе заключена почти половина энергии, поступающей на ферму с кормами!

**Производительность**: Переработка навоза от 10 голов крупного рогатого скота позволяет получить в сутки около  $20 \text{ м}^3$  биогаза, от 10 свиней –  $1\text{-}3 \text{ м}^3$ . Тонна соломы дает  $300 \text{ м}^3$  биогаза, тонна бытовых отходов -  $130 \text{ м}^3$ . Потребность в газе деревенского дома, включая отопление и горячее водоснабжение, составляет в среднем  $10 \text{ м}^3$  в сутки => ферма экономит на газе и на переработке отходов.

**Затраты**: Так как температура окружающей среды ниже оптимальной для культуры бактерий, то часть газа тратится на подогрев реактора.

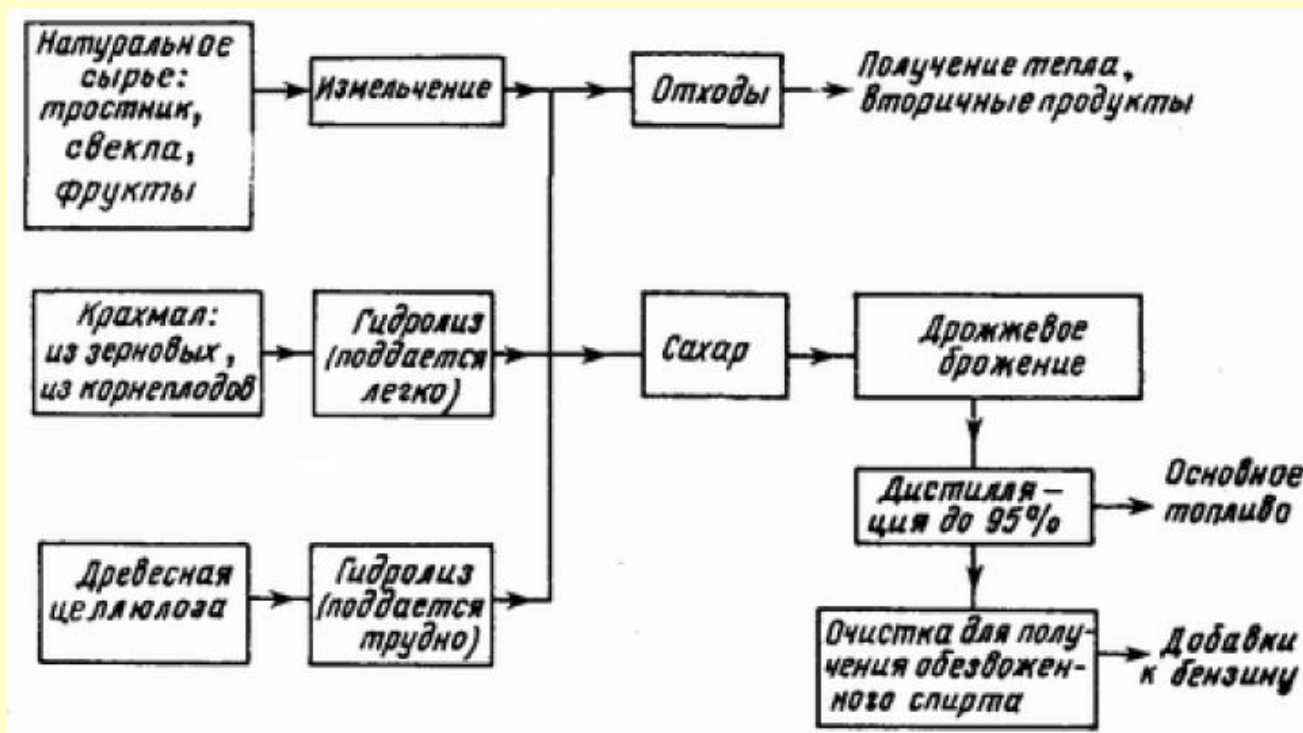
**Результат**: Биореактор объемом  $50 \text{ м}^3$  дает в сутки  $70 \text{ м}^3$  осушенного биогаза (содержит 55-75 %  $\text{CH}_4$ ), что обеспечит 7 деревенских домов. Энергоемкость получаемого газа –  $23 \text{ МДж/м}^3$ . Годовой выход – 25 тыс.  $\text{м}^3$  – позволяет сэкономить 17 т жидкого топлива.

**Транспортировка**: Давление газа, получаемого в биореакторе ( $1\text{-}3 \cdot 10^3 \text{ Па}$ ), достаточно для его подачи на расстояние до 0.5 км без компрессоров.

**Пример использования**: С 2010 года биогаз поставляется в газовую сеть Англии: отходы 30000 домов в Оксфордшире производят метан для обеспечения 200 домов.

# Биоэтанол

Спирт в естественных условиях образуется из сахаров дрожжами (до 10%), для повышения концентрации – перегонка (дистилляция) (до 95%), обезвоживание – перегонка совместно с бензолом.

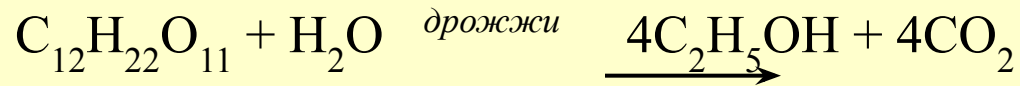


**Основные энергозатраты связаны с дистилляцией.**

Использование отходов биомассы для выработки электроэнергии и обеспечения производства теплом – основа рентабельности получения этанола.

# Процессы производства этанола

1. Из промышленной сахарозы из сока сахарного тростника:



В производстве выход ограничивается конкурирующими реакциями и потреблением сахарозы на увеличение массы дрожжей, до величин около 80%.

2. Из сахарной свеклы получается сахар для сбраживания. Меньше отходов для получения тепла => процесс получения этанола дорожает.

3. Из растительного крахмала, например, из злаковых, подвергаемого гидролизу на сахар. Крупные молекулы крахмала могут быть разрушены на глюкозные остатки ферментами солода или грибков; либо при обработке сильными кислотами, что удорожает процесс.

4. Из целлюлозы. Имеет полимерную структуру связей молекул глюкозы, трудно поддающуюся гидролизу. Гидролиз целлюлозы в кислоте дорог и энергоемок. При использовании грибков – дешевле, но медленнее. В основе промышленного процесса – использование измельченной древесной массы или старых газет. Механическое разрушение древесины – наиболее энергоемкая и дорогая стадия процесса.

# Выход этанола из некоторых культур

Культура	Выход этанола из 1 т культуры, л/т	Основные регионы производства
Сахарный тростник	70	Центральная Америка
Маниок	180	Центральная Америка, Тихоокеанский регион
Сладкое сорго	86	Азия, США
Сладкий картофель	125	Азия, Центральная Америка
Зерновые, кукуруза	370	Повсеместно, лидер – США
Плодовые	160	Повсеместно

*Отходы производства годятся для производства биогаза!*

# Использование этанола в качестве топлива

**Варианты:** переделка двигателей под 95% этанол, либо заправка обычных двигателей смесью из 100% этанола с бензином в соотношении 1:10.

Смесь бензина с обезвоженным этанолом – **газохол** – применяется в Бразилии, в США. Не требует переделки двигателя.

Добавка этанола позволяет выдерживать ударные нагрузки без взрыва – заменитель свинецсодержащих присадок. Кроме того, уменьшается выброс CO.

Теплота сгорания этанола ( $24 \text{ МДж/м}^3$ ) на 40% ниже, чем у бензина ( $39 \text{ МДж/м}^3$ ), но эффективное горение компенсирует уменьшение теплотворной способности.

То есть двигатели потребляют примерно одинаковое количество газохола и бензина.

**Перспектива:** смесь этанола с бензином в соотношении 85:15 (т.н. E85), популяризируется в США, Бразилии, Швеции. Расход топлива возрастает не более чем на 12%.

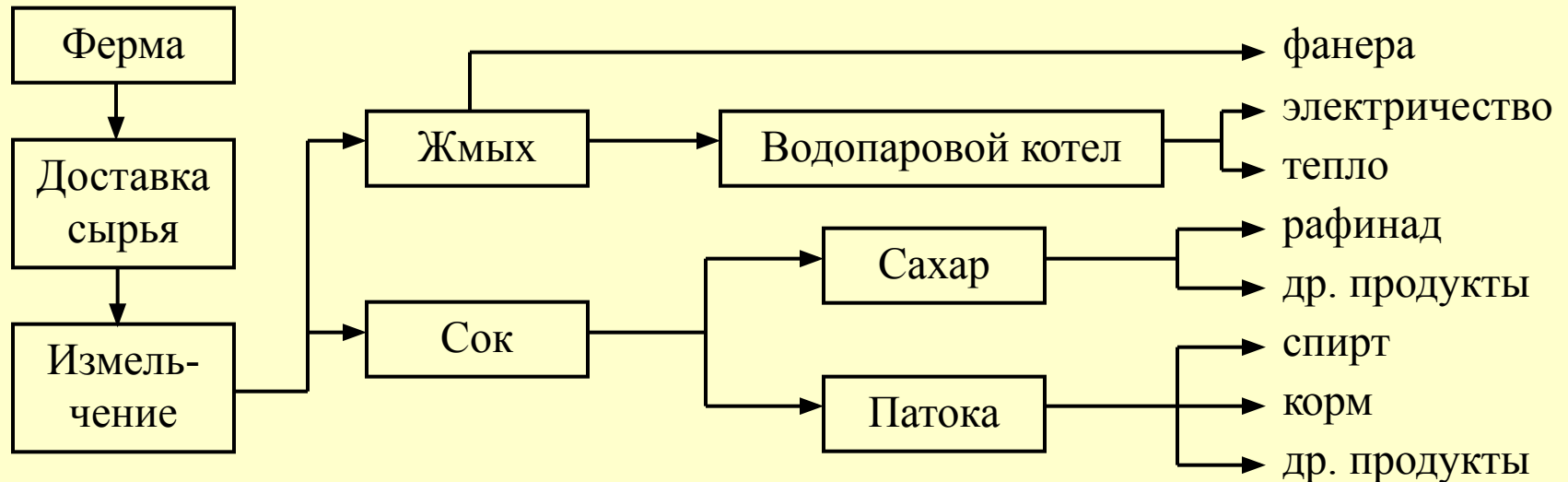
**Проблемы:** с возрастанием содержания спирта топливо становится агрессивным по отношению к резине. В обычных двигателях может применяться лишь краткое время.

# Максимально полное использование отходов

**Энергетическая ферма** – производит энергию в качестве основного или дополнительного продукта тех видов деятельности, в результате которых образуются органические отходы.

Простейшая цель – только производство энергии, но с помощью энергетического анализа выгодно найти наилучшее соотношение между получением из различных видов биомассы энергии, топлива и т.д.

## Пример – комплексная переработка сахарного тростника



Сжигание отходов переработки – обеспечение энергией и теплом.

Электричество и спирт – выполнение транспортных операций.

Можно добиться почти полного самообеспечения фермы энергией.

1. Состояние альтернативных источников в мировой энергетике
2. Энергия ветра
3. Биоэнергия
4. Энергия Солнца
5. Геотермальная энергия
6. Энергия океана
7. Пример: Альтернативная энергетика в Германии
8. Дополнительная информация

# Интенсивность солнечного излучения

Источник энергии солнечного излучения – термоядерная реакция на Солнце.

Но ей надо преодолеть атмосферу! До земли дойдет не все!

Атмосферная масса  $AM$  – отражает влияние атмосферы на интенсивность и спектр излучения, дошедшего до земли.

$$AM(p) = (p/p_0) \cdot \sin^{-1} \theta ,$$

где  $p$  – давление,  $\theta$  – высота Солнца над горизонтом.

На самом деле поглощение солнечного излучения также зависит и от длины волны излучения, и от местных средних атмосферных условий.

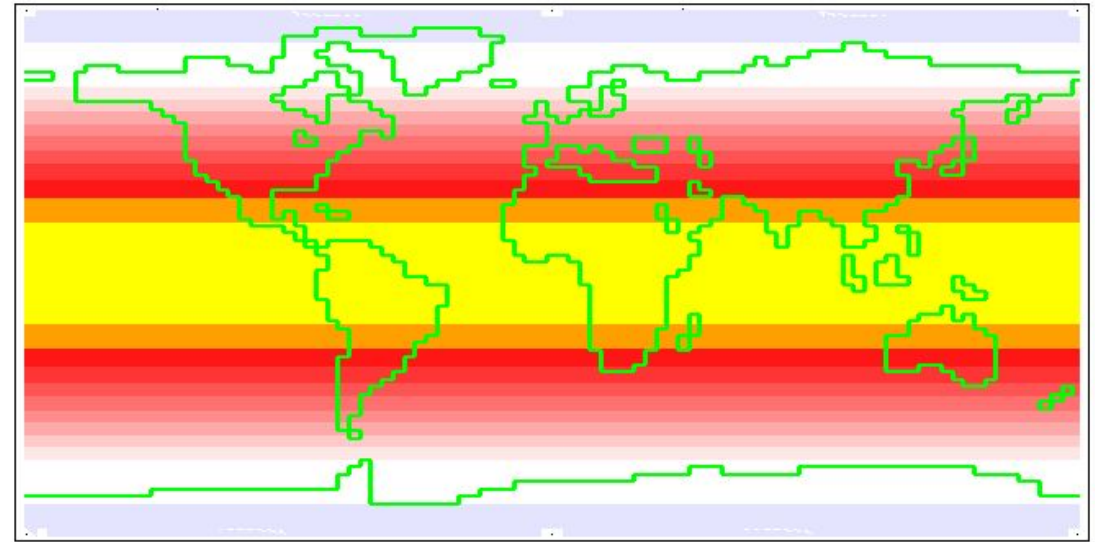
Результаты расчета с учетом влияния атмосферы представлены на следующем слайде.



# Распределение солнечного излучения

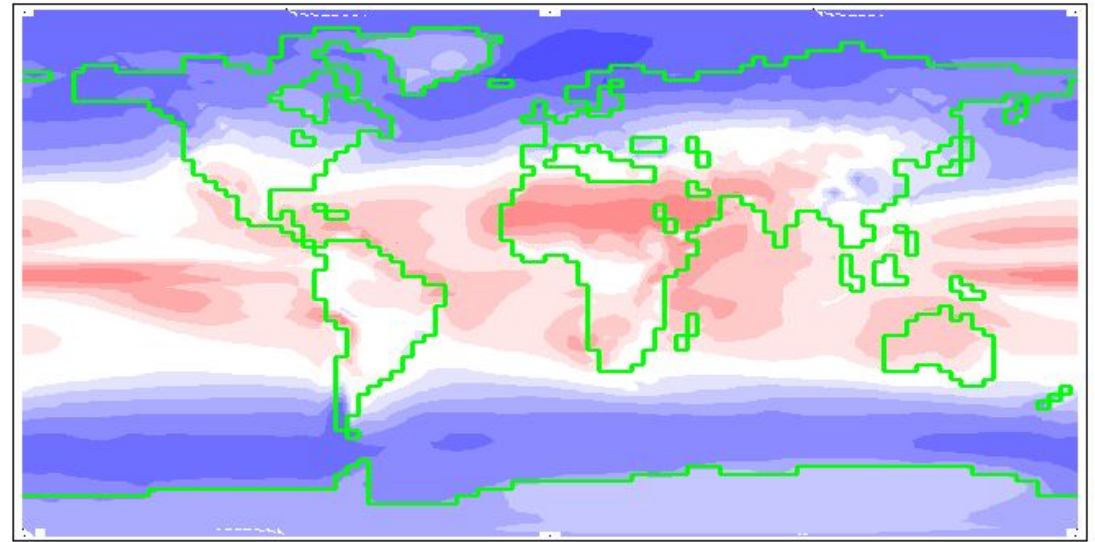
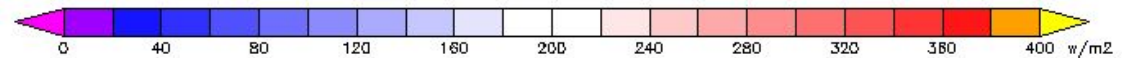
Верхний рисунок:

среднегодовая  
внеатмосферная  
плотность солнечного  
излучения, Вт/м<sup>2</sup>



Нижний рисунок:

распределение  
приповерхностной  
плотности излучения,  
расчет по модели  
климата. Учтены  
атмосферное  
поглощение и  
отражение.



# Солнечные ресурсы России



□ Плотность солнечной энергии России ниже в 2-4 раза плотность в наиболее эффективных «пустынях»

По материалам журнала «Экологические системы», №11, 2009 г. [http://esco.co.ua/journal/2009\\_11/art168.htm](http://esco.co.ua/journal/2009_11/art168.htm)

# Россия: влияние облачности

## ЭНЕРГОРЕСУРСЫ РОССИИ Солнечная энергия



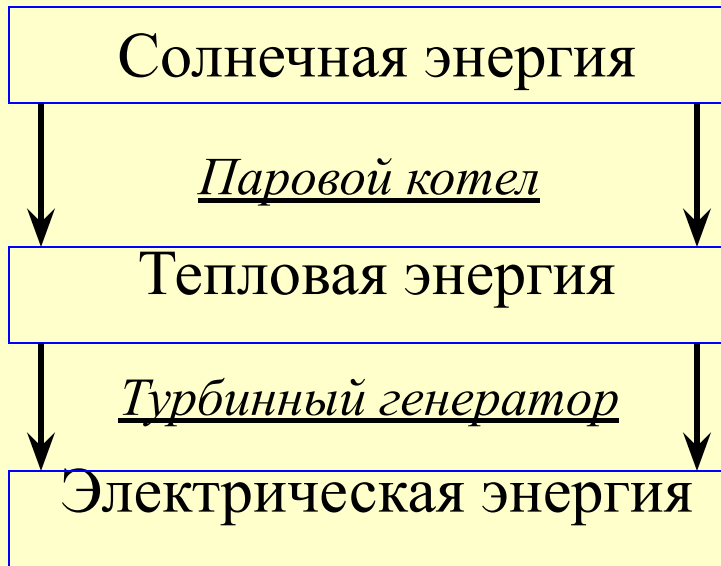
- Продолжительность солнечного сияния в России также ниже в 2-4 раза показателей в «солнечных» странах



# Солнечные электростанции

Используют энергию солнечной радиации для выработки электроэнергии

## Тепловые:



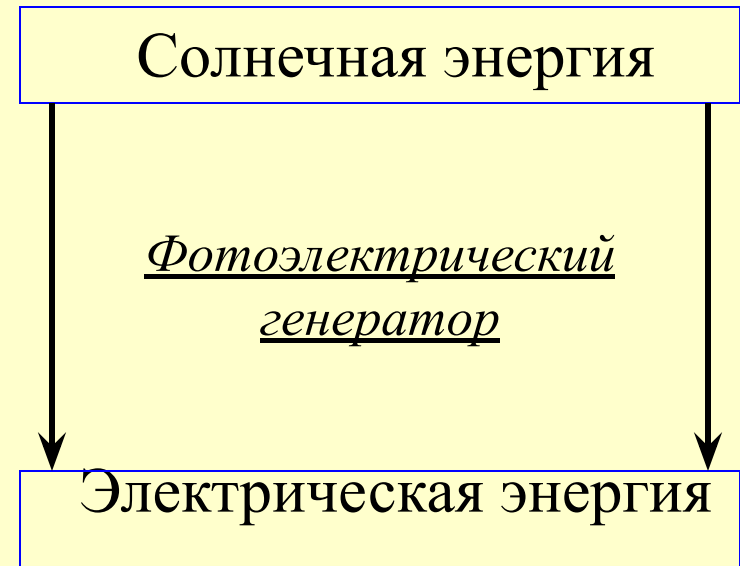
**Пример:** *Solar Energy GS, США*

*Последний этап сдан в 1990.*

*936000 приемников излучения*

***354 МВт***

## Фотоэлектрические:



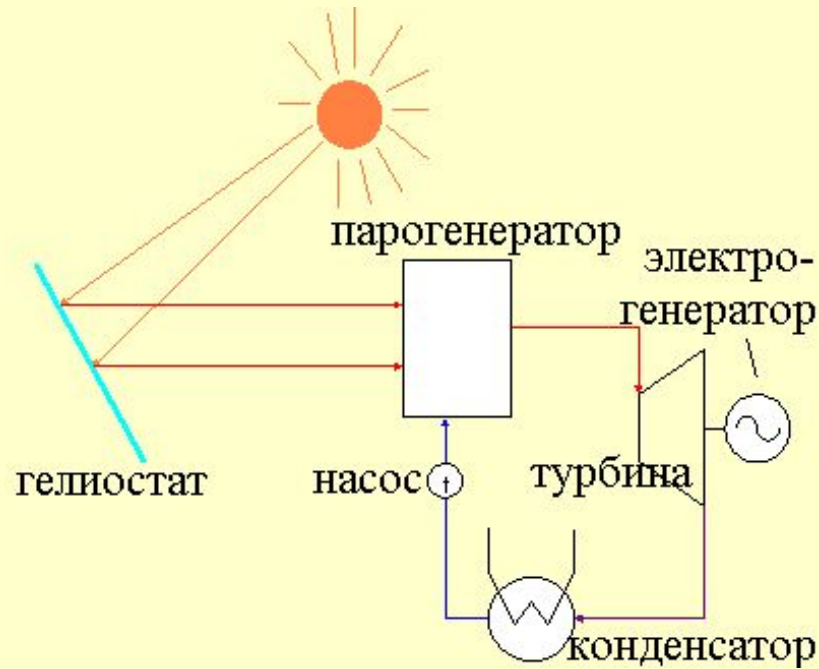
**Пример:** *Аgua Caliente, США*

*Очередной этап сдан в 2012.*

*5.2 млн фотоэлектромодулей*

***247 МВт*** (к 2014 г. – ***397 МВт***)

# Солнечные тепловые электростанции

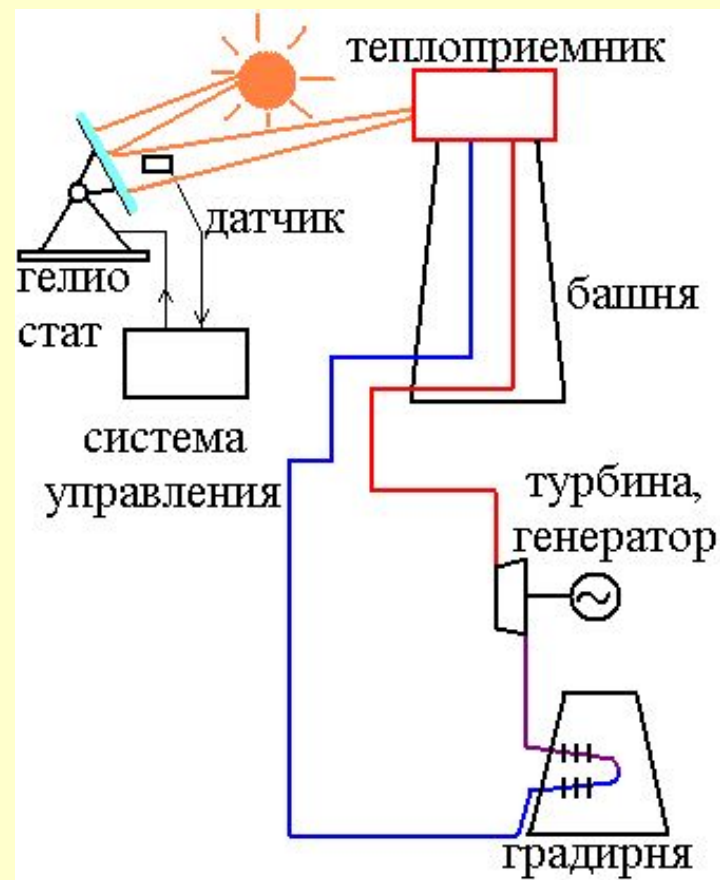
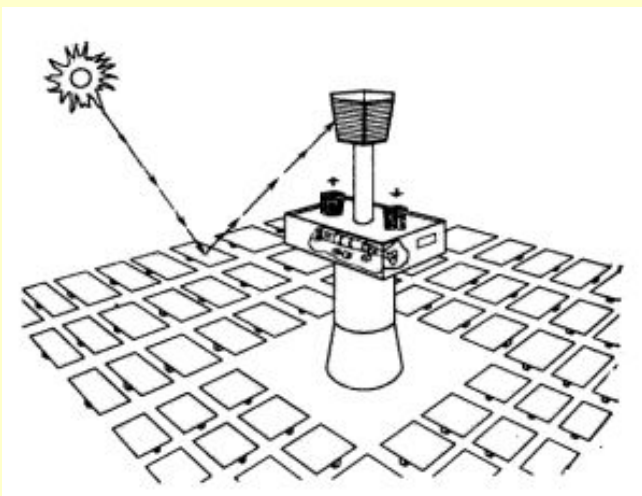


Основное направление утилизации солнечной теплоты – использование схем с **концентрированием** солнечной энергии посредством зеркал или линз. Существует много способов преобразования солнечной энергии в электрическую. Эффективным для большой энергетики является паротурбинный способ, аналогичный применяемому на обычных ТЭС.

Основные используемые типы тепловых солнечных электростанций (СЭС): башенные СЭС и СЭС с солнечными прудами.

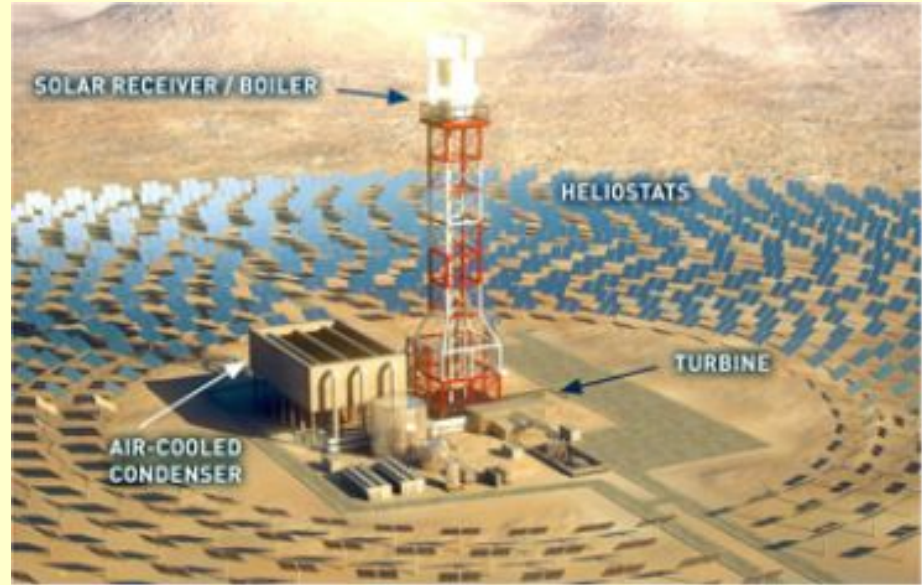
# Солнечные электростанции башенного типа

Размещенные на большой площади фокусирующие элементы (*гелиостаты*) улавливают солнечные лучи и концентрируют их, направляя на паровой котел, установленный на вершине башни. При высоте башни ~100 метров мощность такой станции может достигать десятков МВт при КПД около *17%*.



*J. Graham-Cumming, "The geek atlas", O'Railly Media, 2009*  
[http://books.google.ru/books?id=HhEC0q-O1ewC&pg=PA112&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](http://books.google.ru/books?id=HhEC0q-O1ewC&pg=PA112&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

# Пример башенной СЭС – Ivanpah



- Расположена в пустыне Мохаве, на границе Невады и Калифорнии, недалеко от Лас-Вегаса. Площадь – 1420 га.
- Строительство начато в 2010, завершение планируется на 2013. План по установленной мощности – 392 МВт (сейчас – 31%). Строительство может затянуться из-за протеста экологов – в районе проживают редкие пустынные черепахи, проект уже урезан на 50 МВт.

<http://ivanpahsolar.com>

# Многоуровневая система аккумуляции энергии

Предлагается трёхуровневая система аккумуляции энергии

- Первый уровень – теплохранилище (3-х часовой запас рабочей энергии для турбогенератора) – жидкие нитраты при температуре до 380°C
- Второй уровень – электрохимические аккумуляторы с запасом на несколько суток непогоды
- Третий уровень – традиционная ТЭС, топливо для которой накапливается и синтезируется из выхлопных газов ТЭС и водорода, получаемого на СТЭС электролизом от избыточной электроэнергии солнечной энергосистемы (чрезвычайный уровень, рассчитанный на затяжную непогоду).



# Параболические желоба

Еще один тип солнечных концентраторов – параболические желоба – это длинные параболические зеркала с трубками (теплоноситель - масло) вдоль их фокальных осей.

Желоба ориентированы с севера на юг и поворачиваются к солнцу.

Тепловая эффективность нагрева теплоносителя – *60-80%*.

Теплоноситель идет на кипячение воды, пар которой вращает турбину.



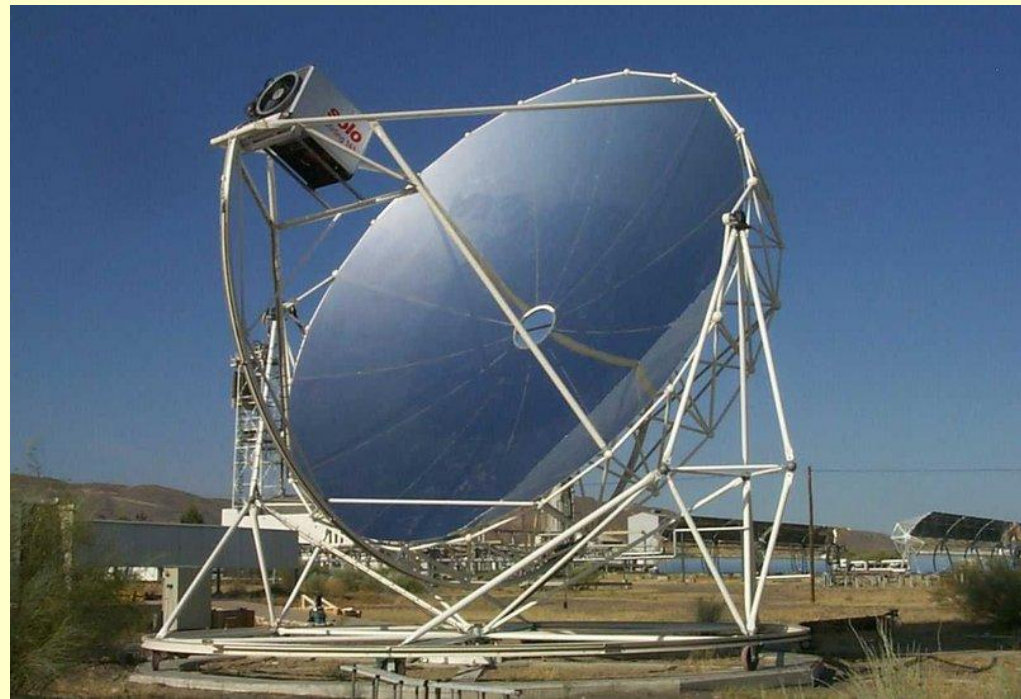
Примеры: **Nevada Solar One**, США, *64 MВт* (открыта в 2007);  
**Andasol 1-3**, Испания, *150 MВт* (открыта в 2009)

# Параболические концентраторы



Параболические концентраторы – по сути дела объединенные в монолит элементы СТЭС башенного типа.

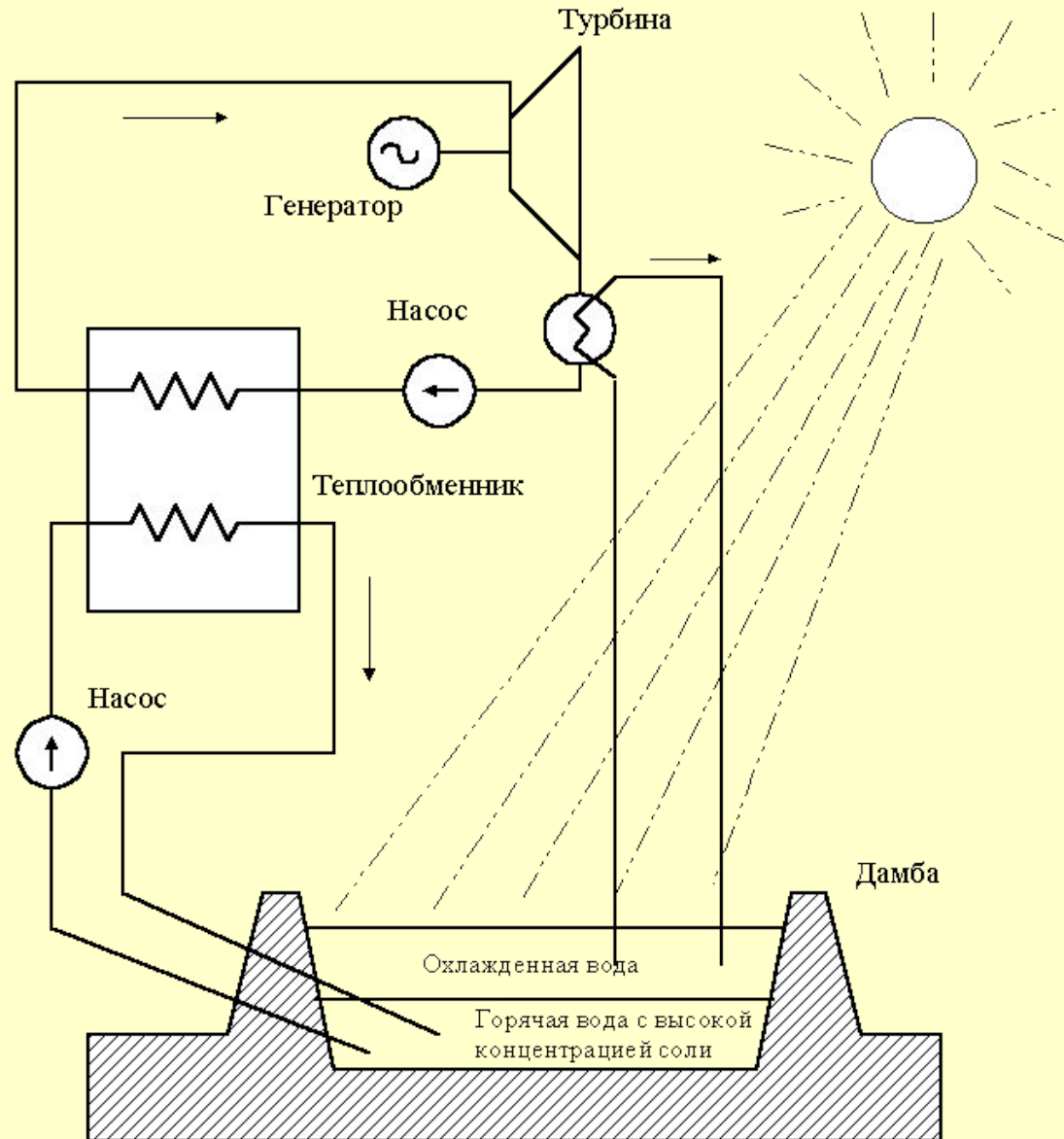
Экспериментальные проекты: Odeillo (Французские Пиренеи, фото вверху), Dish Stirling (США, справа). Мощность  $\sim 100$  МВт.



# Солнечные пруды

В водоем на различных уровнях вводится разное количество солей. При этом создаются *слои раствора* с разной концентрацией и плотностью. *Нижние слои*, у которых выше концентрация и плотность соли, *нагреваются* под действием солнечной радиации *более интенсивно* ⇒ возникает температурный градиент.

Горячая вода ( $60-90^{\circ}\text{C}$ ) из нижних слоев подается в теплообменник для испарения жидкости с низкой температурой кипения (фреон, пропан, аммиак). Пары этой жидкости приводят во вращение турбину.



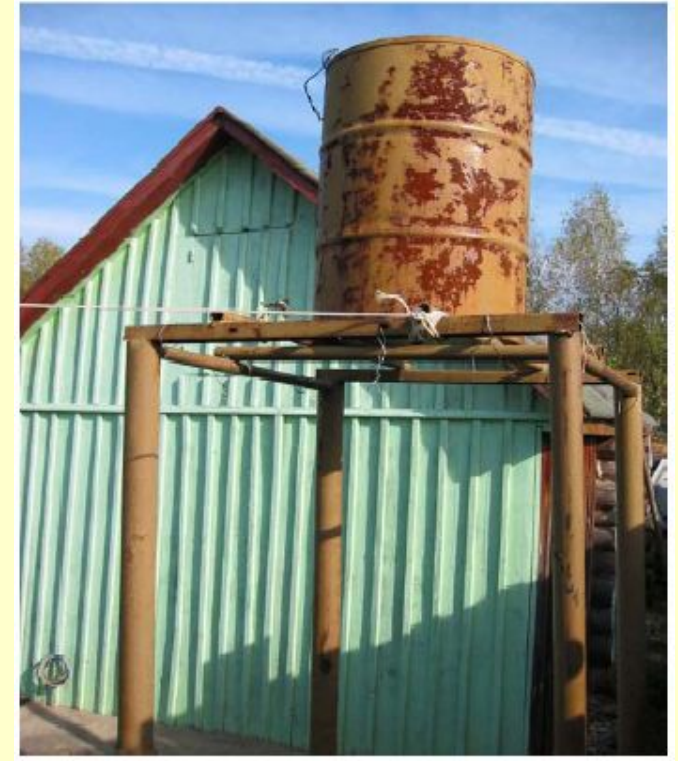


# Прямое использование солнечного тепла



*с концентрацией*

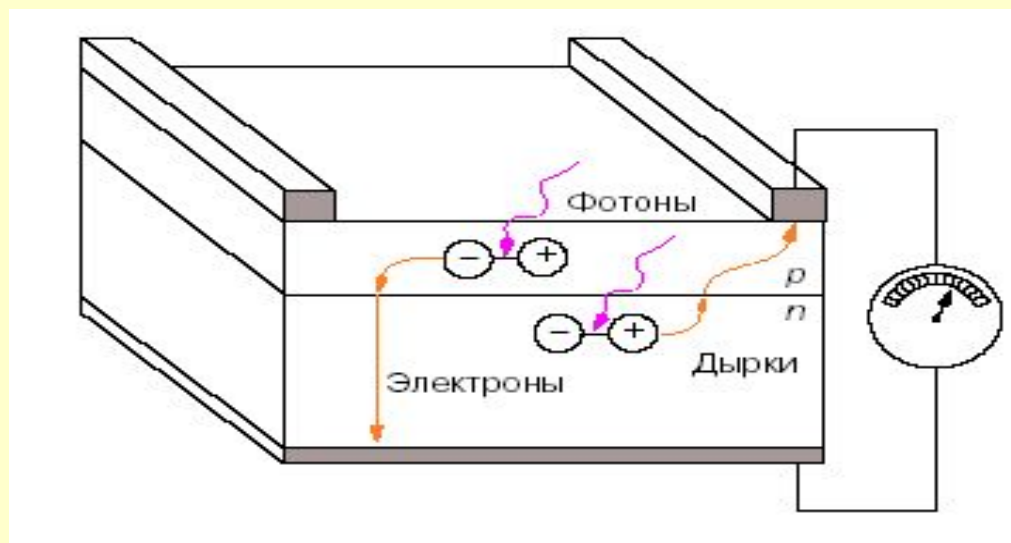
Очаг без использования дров!



*без концентрации*

Горячий душ

# Фотоэлектрические солнечные электростанции



- Устройство, наиболее эффективное с энергетической точки зрения (прямой, одноступенчатый переход энергии)
- Предельный теоретический КПД  $> 90\%$
- В лабораторных условиях к 2012 году достигнут КПД  $44\%$ , а его увеличение до  $50\%$  - дело ближайшего будущего
- К сожалению, промышленно выпускаемые имеют КПД  $8-10\%$ .

# Основные необратимые потери в ФЭП

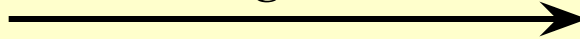
- отражение солнечного излучения от поверхности преобразователя,
- прохождение части излучения через ФЭП без поглощения в нем,
- рассеяние на тепловых колебаниях решетки избыточной энергии фотонов,
- рекомбинация образовавшихся фотопар на поверхностях и в объеме ФЭП,
- внутреннее сопротивление преобразователя.

Предложены достаточно экзотические методики повышения КПД. Например: солнечный свет разлагают, каждый участок спектра попадает на свой оптимизированный ФЭП.

# Современные фотоэлектростанции

Крупнейшие в мире фотоэлектростанции: *Agua Caliente* (США), *250 МВт*; *Charanka* (Индия), *214 МВт*, *Golmud* (Китай), *200 МВт*.

*Строительство Agua Caliente*



Большинство проектов продолжает развиваться – Agua Caliente к 2014 году достигнет 397 МВт, Charanka – 500 МВт к тому же году.

Westlands Solar Park (США) – к 2015 году должна выйти на мощность 2.7 ГВт!

Строительство активно поддерживается государством: предоставляют налоговые льготы и государственные поручительства по кредитам, а потребителей заставляют приобретать определенный процент электричества от возобновляемых ресурсов.

# Достоинства солнечной энергетики

- Общедоступность и неисчерпаемость источника.
- Теоретически (как утверждают ее сторонники) полная безопасность для окружающей среды
- **Однако!** В настоящее время в производстве фотоэлементов и в них самих используются вредные вещества- свинец, кадмий, галлий, мышьяк и др.).
- **Однако!** Есть еще принципиальная проблема, которая связана с тем, что глобальное использование солнечной энергетики может изменить альбедо земной поверхности (сейчас ~35% и определяется отношением отраженной и рассеянной солнечной энергии к падающей на Землю) и привести к изменению климата.



# Фундаментальные проблемы СЭС

- Из-за относительно небольшой величины солнечной постоянной для солнечной энергетики требуется использование больших площадей земли под электростанции (например, для электростанции мощностью 1 ГВт это может быть пара десятков квадратных километров).
- Поток солнечной энергии на поверхности Земли сильно зависит от широты и климата. В разных местах количество солнечных дней в году может различаться очень сильно.

Все это приводит к тому, что солнечная энергетика может эффективно применяться в крупных масштабах только на отдельных территориях, причем это будет наносить урон природопользованию (например, отбирать площади у сельского хозяйства). Для снабжения несолнечных регионов придется строить ЛЭП.

# Технические проблемы СЭС

- Солнечная электростанция не работает ночью и недостаточно эффективно – в утренних и вечерних сумерках. При этом пик электропотребления приходится именно на вечерние часы. Кроме того, мощность электростанции может резко и неожиданно колебаться из-за смены погоды.
- Временная проблема – дороговизна солнечных фотоэлементов. С 1990 по 2005 г. цены на фотоэлементы снижались на 4 % в год, а с выходом на рынок Китая за период 2008-2012 они упали в 3 раза.
- Недостаточный КПД солнечных элементов. Вероятно, будет вскоре увеличен.
- Поверхность фотопанелей нужно очищать от пыли и других загрязнений. При их площади в несколько квадратных километров это может вызвать затруднения.
- Эффективность фотоэлектрических элементов заметно падает при их нагреве, поэтому возникает необходимость в установке систем охлаждения, обычно водяных.
- Через 30 лет эксплуатации эффективность фотоэлектрических элементов начинает снижаться.

# Экологические проблемы СЭС

- Несмотря на экологическую чистоту получаемой энергии, сами фотоэлементы содержат ядовитые вещества, например, свинец, кадмий, галлий, мышьяк и т. д., а их производство потребляет массу других опасных веществ. Из-за этого в 2011 году было закрыто два завода по производству фотоэлементов недалеко от Шанхая.
- Современные фотоэлементы имеют ограниченный срок службы (30—50 лет), и массовое применение поставит в ближайшее же время сложный вопрос их утилизации, который тоже не имеет пока приемлемого с экологической точки зрения решения.
- Из-за экологических проблем и возникшего дефицита кремния начинает активно развиваться производство тонкопленочных фотоэлементов, в составе которых содержится всего около 1 % кремния. К тому же тонкопленочные фотоэлементы дешевле в производстве, но пока имеют меньшую эффективность.

<http://www.bbc.co.uk/news/world-asia-pacific-14968605>

# Проблема аккумуляции энергии

Как указывалось ранее, одним из основных недостатков солнечной энергетики является ее непостоянство из-за смены погоды и времени суток.

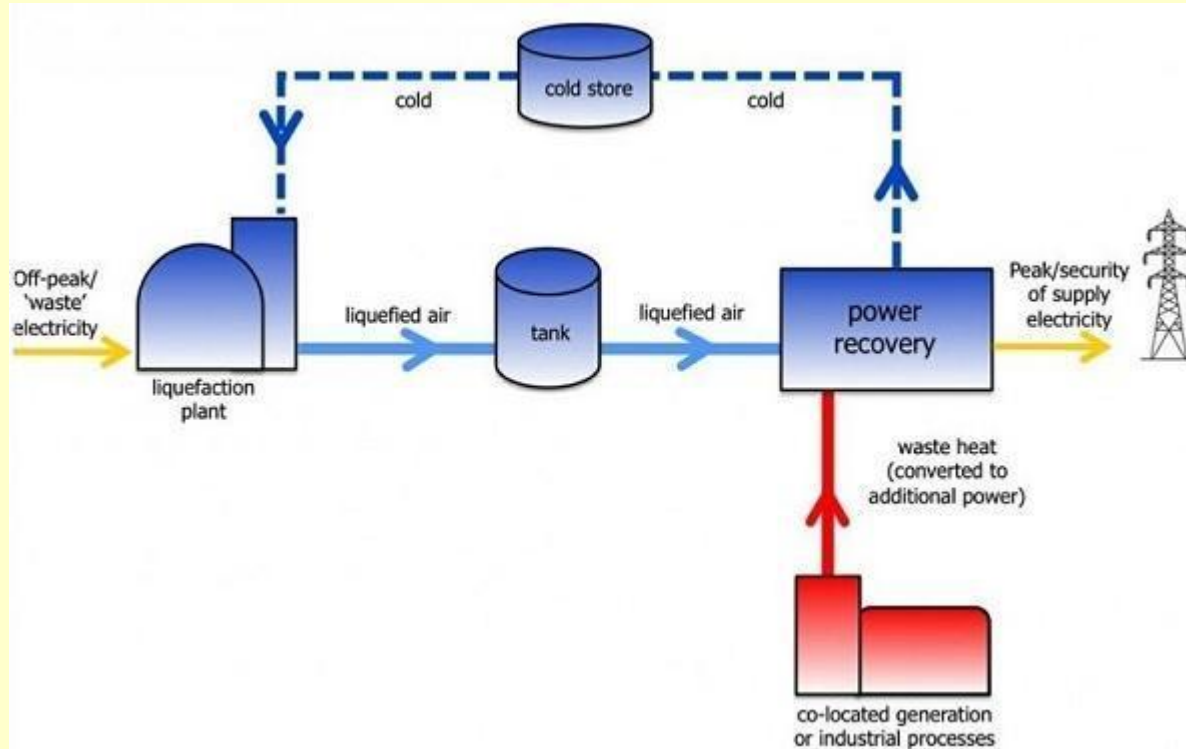
Для преодоления этих недостатков нужно или накапливать тепло в веществе, либо использовать эффективные электрические аккумуляторы, либо использовать концепцию водородной энергетики.

Накопление тепла в веществе использовалось еще в древности, когда для строительства подбирались такие материалы и архитектурные формы, чтобы стены строения максимально прогревались днем и отдавали свое тепло ночью.

Но есть и более современные методы...

# Накопление рабочего тела

На этом принципе работают гидроаккумулирующие электростанции – когда есть «лишняя» энергия, вода закачивается в бассейн, при дефиците ее спускают на турбину.



Другой вариант – сжижение азота из воздуха, при необходимости он превращается в газ за счет отработанного пара ТЭС и направляется на турбину.

КПД процесса при многоступенчатой системе охлаждения достигает 70%.

[http://www.highview-power.com/wordpress/?page\\_id=8](http://www.highview-power.com/wordpress/?page_id=8) ; <http://science.compulenta.ru/711648/>

# Прочие методы аккумуляции энергии

- Солнечная энергия может быть запасена в виде нагретого вещества расплавов солей, например,  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{KNO}_3$ , при необходимости ее направляют на испарение воды.
- Использование теплоты фазового перехода – при застывании парафина выделяется значительное количество энергии. В основном используется для получения только тепла, а не электричества.
- Использование крупных электрических аккумуляторов. Емкость рассчитывается на 3-5 дней непогоды. Эффективность использования заряда 70-92%.
- Совмещение с водородной энергетикой. С помощью «лишней» энергии с солнечной электростанции можно производить электролиз воды. Полученный водород может быть запасен, как любое другое газообразное топливо.
- Дополнительные материалы по этим методам приведены в Разделе 8.

1. Состояние альтернативных источников в мировой энергетике
2. Энергия ветра
3. Биоэнергия
4. Энергия Солнца
5. Геотермальная энергия
6. Энергия океана
7. Пример: Альтернативная энергетика в Германии
8. Дополнительная информация

# Происхождение термальных вод

Геотермика изучает тепловое состояние земной коры и Земли в целом в зависимости от геологического строения, магматических процессов и т.д.

Критерий теплового состояния земной коры – поверхностный градиент температуры.

Геотермическая ступень  $\sigma$  – глубина в метрах, при которой температура растет на  $1^\circ$ . При определении не учитывают первые 2-40 м, где существуют суточные и годовые колебания. Температура  $T$  на произвольной глубине:

$$T = t_g + (H + h) / \sigma ,$$

где  $t_g$  – температура воздуха,  $H$  – исследуемая глубина,  $h$  – глубина слоя постоянных годовых температур.

Среднее по Земле  $\sigma = 33$  м. Однако значения сильно варьируются. В областях современного вулканизма  $\sigma = 2-3$  м. На Камчатке на глубине  $\sim 500$  м  $T \approx 200^\circ\text{C}$ .

В зонах вечной мерзлоты с глубиной промерзания более 1000 м  $\sigma$  составляет около 500 м. В условиях платформенной территории (европейская часть России)  $\sigma$  составляет  $\sim 50$  м.



# Классификация термальных вод

**Вода** – подвижный и теплоемкий энергоноситель, насыщающий породы осадочных и гранитных оболочек. Она играет важную роль в тепловом балансе.

По всему земному шару, на определенной глубине, зависящей от геотермических особенностей, залегают пласты, содержащие термальные воды – **гидротермы**. В районах вулканизма она выходит на поверхность – горячие источники, гейзеры...

Основной параметр - температура подземных вод. Могут быть от *слаботермальных* ( $37^{\circ} < t < 40^{\circ}$ ) до *перегретых* ( $t > 100^{\circ}$ ).

Классифицируются также: по *минерализации*, по *жесткости*, по *кислотности*, по *газовому составу* (сероводородные, углекислые, метановые, азотные и т.д.), по *газонасыщенности*.

Встречаются экзотические виды: сверхкрепкие рассолы (минерализация  $> 600$ г/л), с растворенными агрессивными газами (атомарный водород) и т.д.

Могут быть использованы все виды вод: перегретые – электроэнергетика, пресные термальные – теплообеспечение, солоноватые – медицина, рассолы – промышленное сырье.

# Происхождение термальных вод

За счет постепенного отбора тепла у пород:

**Инфильтрационные** – проникающие через поры с поверхности Земли в глубину. Водостоки постепенно нагреваются, в равнинных районах становятся термальными на глубине ~1 км. При быстром подъеме наверх по крупным дефектам коры не успевают остыть – горячие ключи. Можно получать искусственно бурением скважин: с глубины до 4 км – вода до 100°.

Из тепловых очагов:

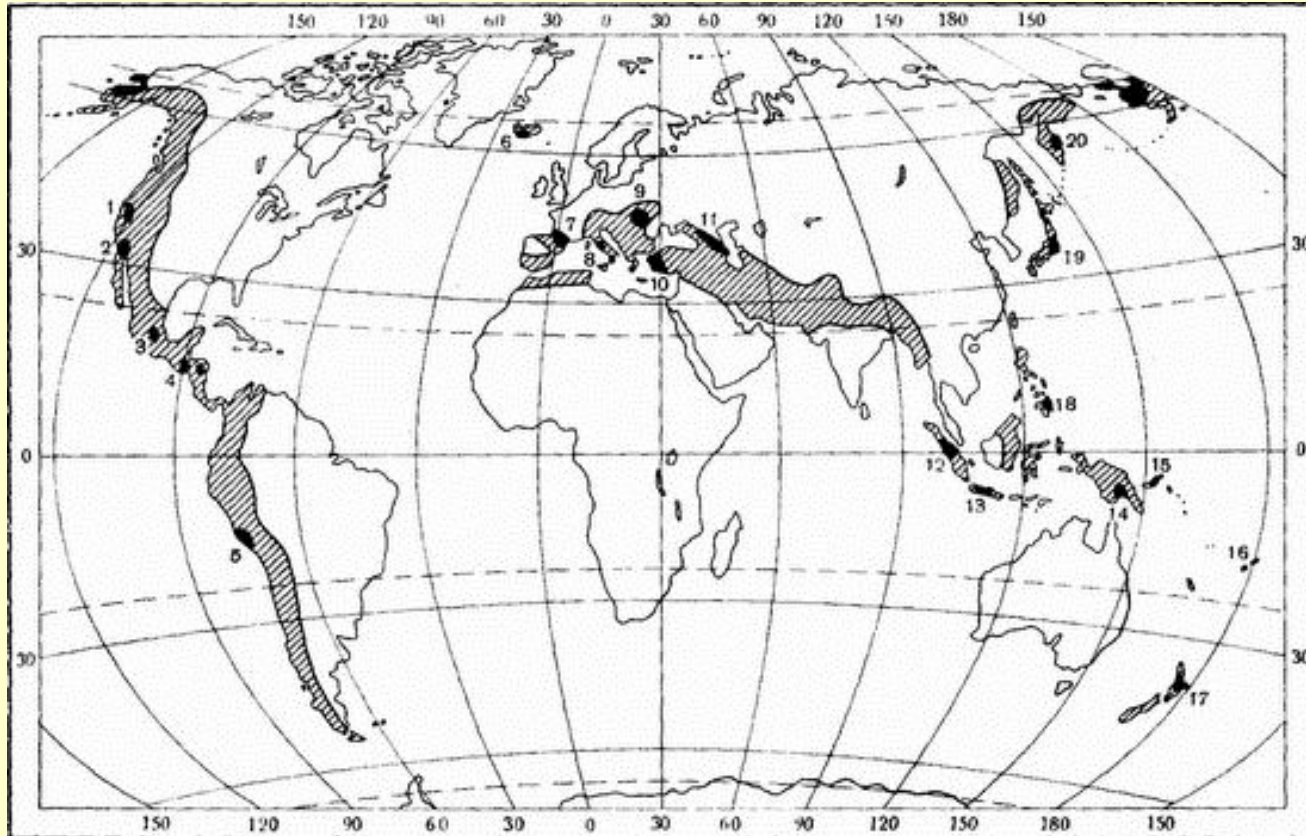
**Вулканические** – инфильтрованная вода, перегретая расплавом магмы – гейзеры, грязевые грифоны и котлы, паровые струи и т.д.

## Типы месторождений термальных вод

**Конвекционное происхождение** – в районах современной или недавней вулканической деятельности (повышенный температурный градиент – 45-70°/км). На поверхность выходят горячие воды и пароводяная смесь. Нынешние ГеоТЭС работают в таких районах.

**Кондуктивный прогрев** – воды сосредоточены в платформенных и предгорных впадинах при нормальном геотермическом градиенте (33°/км). Обнаружены сотни бассейнов в несколько млн.км<sup>2</sup>. Перспектива: с глубин до 15 км – до 350°.

# Распространение термальных вод



Районы выхода на поверхность кристаллического фундамента (Балтийский щит и т.д.) и приподнятые горы (Урал) – не имеют запаса термальных вод. На участках погружения фундамента – до  $40^{\circ}$ , в предгорных впадинах – до  $100^{\circ}$ .

Максимально «теплые» земные недра в России – Курило-Камчатская вулканическая зона.

Температура пород и содержащихся в них вод зависит от глубины залегания и от близости к центрам геотермической активности (вулканы, разломы и т.д.)

# Геотермальные электростанции

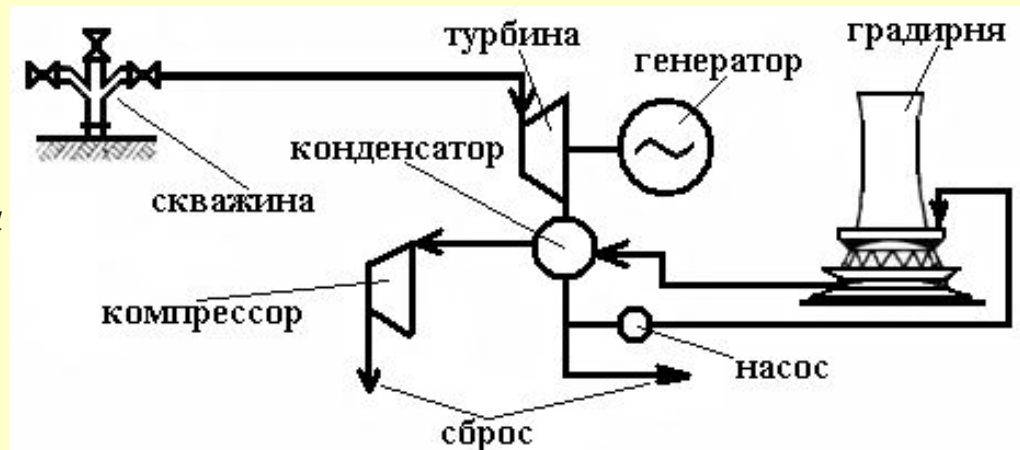
## Прямое использование геотермальной энергии

Геотермальные станции в вулканических районах базируются на месторождениях пароводяной смеси, добываемых из природных коллекторов с глубины 0.5-3 км. Средняя обеспечиваемая мощность скважины ~ 4 МВт.

**ГеоТЭС с непосредственным использованием природного пара:** подается прямо в турбину и далее уходит на сброс. Стоимость минимальна, т.к. состоит только из турбины и генератора, может использоваться как передвижная. Пример: Италия, станция мощностью *16 МВт* (4 генератора по *4 МВт*), снабжается паром от 8 скважин.

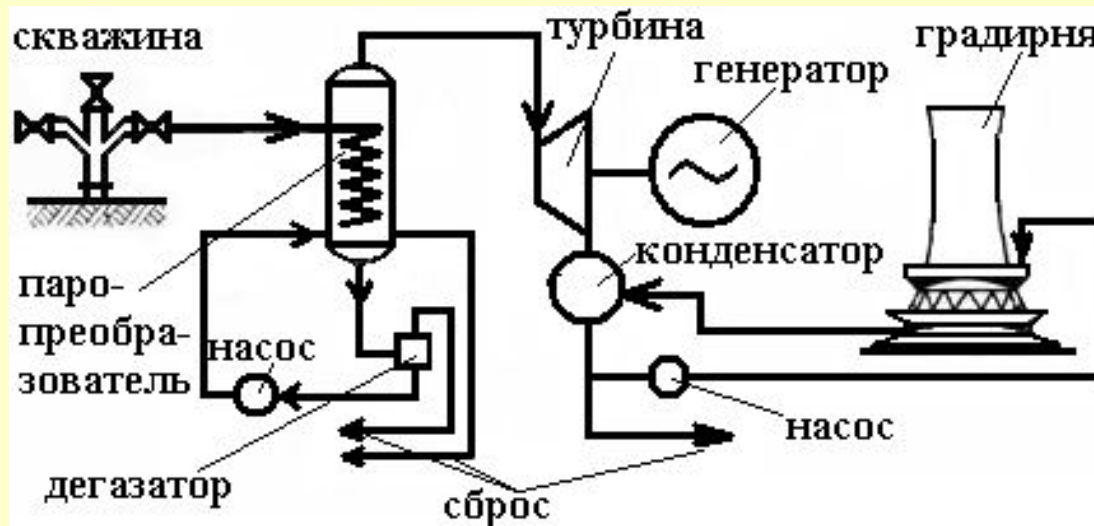
**ГеоТЭС с конденсационной турбиной и прямым использованием природного пара:** конденсат отработанного пара направляется для охлаждения в градирню и далее используется **для охлаждения нового отработанного пара**. Пример: Лардерелло-3 (Италия): 4 генератора по *26 МВт*; 2 - по *9 МВт* (покрытие собственных нагрузок).

*Схема ГеоТЭС с прямым использованием природного пара*



# ГеоТЭС с бинарным циклом

Такие станции выгодны там, где природный пар имеет высокую температуру и большое содержание примесей. Природный пар в паропреобразователе отдает тепло чистому вторичному теплоносителю, идущему на турбину. Природный пар идет на дегазатор.



*Схема ГеоТЭС с паропреобразователем*

Строительство незначительно дороже ГеоТЭС с конденсационной турбиной и прямым использованием пара. Пример: Ландарелло-2 (Италия), 7 турбин по 11 МВт.

По похожему принципу строятся ГеоТЭС на отсепарированном паре, если в паре большое содержание воды. Примеры: Паужетское месторождение (Россия), Хверагерди (Исландия).

Преимущество схемы в том, что чистый пар облегчает работу турбин.



# Состояние геотермальной энергетики в России

1. [Верхне-Мутновская ГеоТЭС](#) (Камчатка) – 3 скважины, 3 турбины по 4 МВт – первая очередь 200 МВт станции, обслуживающей Петропавловск-Камчатский промышленный район (2010). *План*: аммиачный модуль на 6 МВт, работающий на тепле сбросного пара (150°) => себестоимость энергии снизится на 20-30%.
2. [Океанская ГеоТЭС](#) (о. Итуруп) – остров обладает значительными запасами разведанных геотермальных вод. На 2009 г.- 2.5 МВт. *План* – 30 МВт, .
3. [Паужетская ГеоТЭС](#) (Камчатка) – используется отсепарированный пар, 14.5 МВт (2004 г.). Остаток (80% воды 120°) сбрасывается => потери теплового потенциала, ухудшение экологии. *Реконструкция 2010 г.*: сбросная вода – в двухконтурную установку на низкокипящем рабочем теле (изобутан), добавочная мощность – 2.5 МВт, выходная температура - 55°.
4. [Мутновская ГеоТЭС](#) (Камчатка) – комбинированного типа. Отработанный пар направляется в конденсатор, одновременно являющийся парогенератором для второго контура с турбинами на низкокипящем незамерзающем рабочем теле. Облегчается эксплуатация в суровых зимних условиях. 50 МВт на 2011 г.

Также планируются к постройке [Нижне-Кошелевская ГеоТЭС](#) (Камчатка) и [Ставропольская ГеоТЭС](#) (Предкавказье).

<http://www.geotherm.rushydro.ru/upload/iblock/830/hrqrxzjnornaeg%20jstmvlppzs%20ndaxcizjaqaypj%202011.pdf>



# Проблематика

Перспективный район использования ГеоТЭС в России – Камчатка и Курилы – отличаются суровым климатом, что с одной стороны увеличивает затраты на строительство и эксплуатацию ТЭС, с другой – доставка дизельного топлива для ДЭС также дорога.

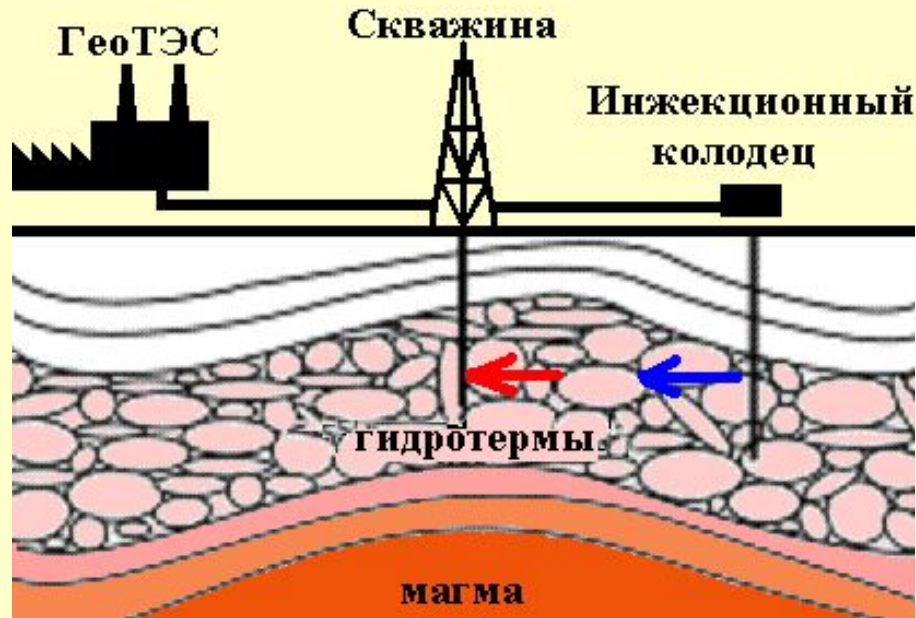
Минусы: нетранспортабельность, рассредоточенность источников, территориальная ограниченность зон применимости, неравномерность работы источника.

## Экологические проблемы:

- сверление большого количества скважин в водоносные слои нарушает тепловой баланс местности;
- вместе с водой из глубины могут выноситься также ядовитые газы (аммиак, сероводород) и элементы (ртуть, мышьяк, сурьма);
- активное вмешательство в баланс водоносных горизонтов может приводить к мелкомасштабным землетрясениям.

Deichmann, N.; et. al. (2007), *Seismicity Induced by Water Injection for Geothermal Reservoir Stimulation 5 km Below the City of Basel, Switzerland*, American Geophysical Union, 2007AGUFM.V53F..08D

# Перспективы использования гидротерм



Новое направление – циркуляционные геотермальные системы с закачкой холодной воды в термоводоносный проницаемый горизонт с дальнейшим извлечением разогретой. Может применяться на малой глубине (~100-200 м).

Основное приложение – использование относительно низкотемпературных вод для отопления. Затраты на сооружение в 2 раза больше, чем на котельную, на эксплуатацию – на 60% меньше, топливо не требуется => окупается за 4-8 лет.

Лидер такого **использования** – **США (3.8 ГВт)**. В **России** предполагается начать использование в Дагестане и Чечне.

1. Состояние альтернативных источников в мировой энергетике
2. Энергия ветра
3. Биоэнергия
4. Энергия Солнца
5. Геотермальная энергия
6. Энергия океана
7. Пример: Альтернативная энергетика в Германии
8. Дополнительная информация

# Использование энергии волн

## Поступление энергии в океан:

поглощение  
солнечного  
излучения

гравитационное  
воздействие  
космических тел

поступление тепла  
из глубины  
планеты

$S_{\text{океана}} = 360 \text{ млн. км}^2$  (70% поверхности Земли) – хорошо поглощает излучение:  
90% **солнечного излучения** поглощается 10-метровой толщей воды.

Запасенное тепло: излучается, идет в атмосферу (испарение, теплопроводность).  
Запасенная водой энергия переносится ветрами и течениями.

1/3 солнечного излучения отражается, а 2/3 испытывают различные изменения:

- 43% преобразуется в тепло
- 22% расходуется на испарение и образование осадков
- 0.2% сообщают энергию ветрам, волнам, течениям
- 0.02% идет на образование продуктов фотосинтеза

Суммарный поток **энергии, поступающей из недр Земли, и приливной энергии,** имеет тот же порядок величины.

Агеев В.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. КТЭС, 2004

# Преобразование энергии волн

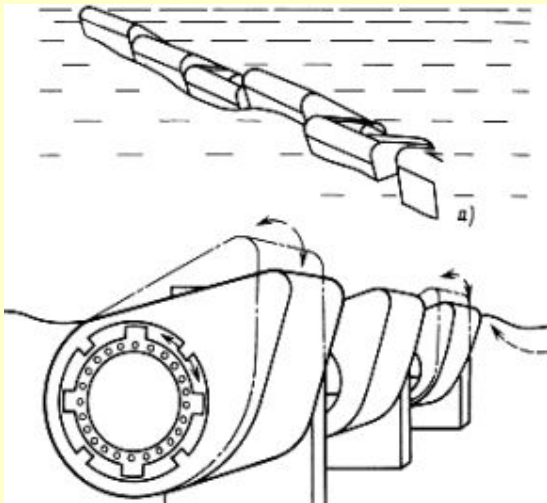
Целесообразность использования энергии волн определяется ее высокой удельной мощностью: в открытом море при волне 10 м она  $\sim 2 \text{ МВт/м}$ .

Технически осуществимо в прибрежных зонах (в мире не более  $80 \text{ кВт/м}$ , в России – см. таблицу).

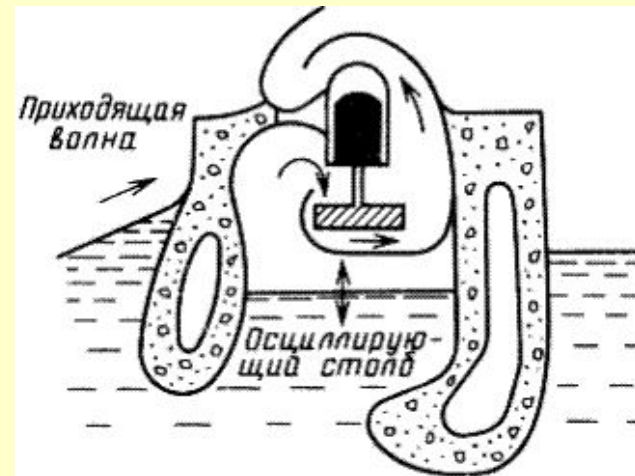
На волновых электростанциях (ВлЭС) кинетическая и потенциальная энергия волн преобразуется в электрическую.

Море	$P_{уд}$ , кВт/м
Каспийское	7-11
Баренцево	22-29
Балтийское	7-8
Охотское	12-20

Удельная мощность ветрового волнения в прибрежной полосе РФ



1. Отслеживание профиля волны.  
Шотландия, 100 МВт с 5 км



2. Энергия колеблющегося столба.  
Норвегия, 500 кВт (тестовый блок)

# Использование энергии приливов

Периоды, высоты и скорости приливов хорошо изучены.

Энергию приливов (за счет использования скорости приливных течений) в узких бухтах для приведения в действие мельниц использовали в Англии в XVI-XVII веках и в Китае.

Можно наполнить бассейн «самотеком» во время прилива и спускать запасенную воду через турбину при отливе.

Пригодные для преобразования течения – у побережья и в проливах.

Устройства преобразования энергии сходны с устанавливаемыми на реках.

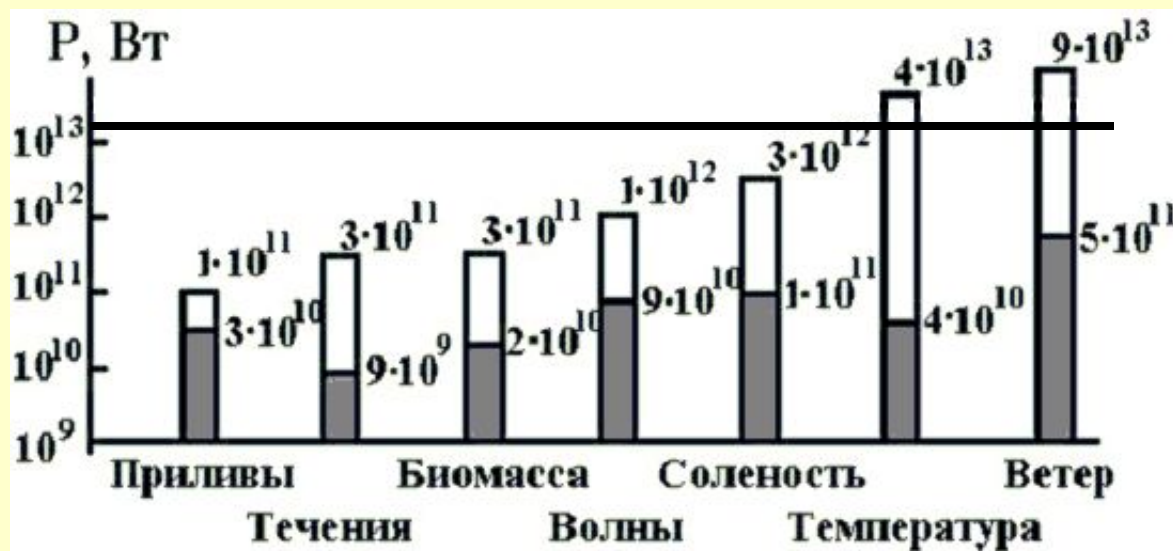
При макс. скорости течения  $5 \text{ м/с}$  средняя мощность  $\sim 14 \text{ кВт/м}^2$ . Перекрыв  $1000 \text{ м}^2 \Rightarrow$  ПЭС  $14 \text{ МВт}$  – всего в 3 раза больше максимальной из стандартных контейнерных дизельных ТЭС!

Затраты на сооружение весьма высоки! Строительство целесообразно лишь в отдаленных районах с высокими скоростями приливов, где другие источники энергии еще более дороги



# Иные варианты использования энергии океана

Для **энергетики** важны не *абсолютные мощности* (полная величина столбцов на диаграмме) различных источников, а лишь та их **часть, которую можно преобразовать** в используемые виды энергии (закрашено серым)



При оценке учитывались: время эффективной работы (для приливов, волн); КПД: (от 3% для преобразования градиента солености до 60% для ветра); возможности размещения с учетом технологических и экологических факторов. Важно учитывать стабильность источника энергии и плотность энергии – дает оценку размеров преобразователей и режимов использования энергии.

Агеев В.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. КТЭС, 2004

# Использование энергии океанских течений

Методика теоретически и практически аналогична использованию ветряков!

Механическая мощность из океанского течения с учетом КПЭ:  $P = \eta A \rho V^3 / 2$

$\eta$  достижимые 0.6-0.75 в зависимости от типа колеса

Формулы – как в ветроэнергетике, но  $\rho$  в 750 раз больше!

## ОКЕАНСКИЕ ТУРБИНЫ

### достоинства

- Стабильность скорости потока
- Защищено от шторма при заглублении
- Повышается предел прочности по весу
- Меньше разрушительных вибраций

### недостатки

- Сложность обслуживания в море
- Коррозия и обрастание
- Сложность передачи энергии
- Большие глубины – удорожание, малые – помехи судоходству

Предпочтительны быстрые и постоянные по направлению течения и удобная для обслуживания география дна.

Географические данные не позволяют *сейчас* строить ОГЭС в открытом океане, где наблюдаются наиболее мощные течения

# Ресурсы тепловой энергии океана

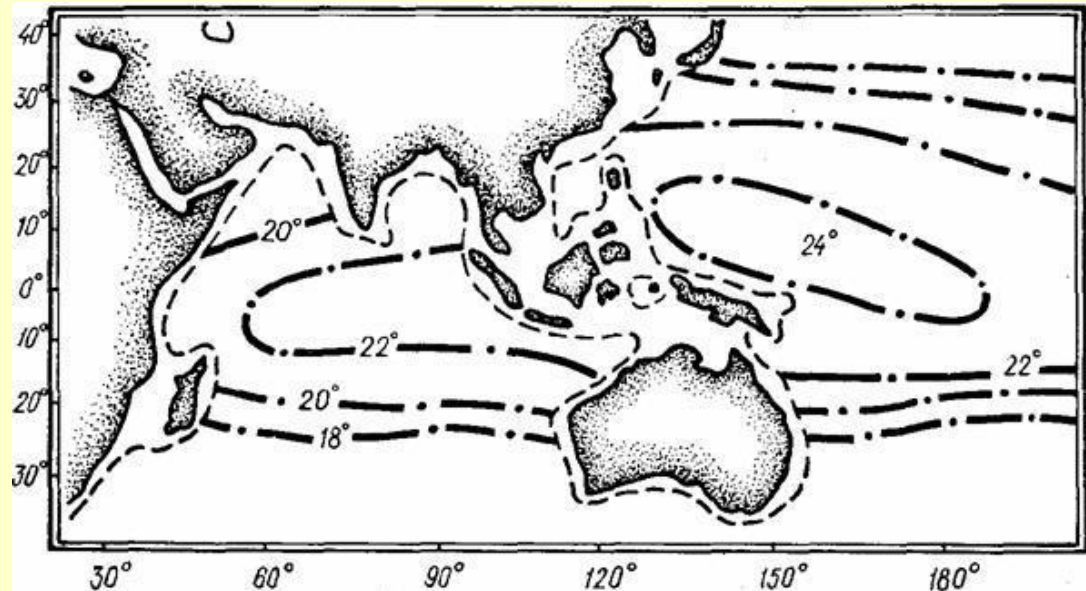
Мировой океан – крупнейший коллектор солнечного излучения!  $\Delta T$  между поверхностными и придонными водами – до  $20^\circ$ .

## Оценка запаса энергии

Пусть  $\Delta T = 12^\circ$  сохраняется на свободной ото льда площади  $3 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$  в слое  $100 \text{ м}$ .  
Тогда  $W = \rho V C_p \Delta T = 1.5 \cdot 10^{24} \text{ Дж}$ .

Для более точной оценки – карта с распределением зон максимального перепада температур.

При изъятии части тепла баланс его в море поддерживается течениями и Солнцем.



Дополнительный вариант: использовать  $\Delta T$  между водой и воздухом.

В Арктике 8 месяцев в году  $T_{\text{воздуха}} < -20^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{воды}} \sim +2^\circ\text{C}$ . При этом  $1 \text{ м}^3$  воды, пропущенный за  $1 \text{ с}$  через преобразователь с  $\eta = 5\%$ , даст  $10 \text{ кВт}$ . Работающая на фреоне система сможет конкурировать с ДЭС на завозном топливе.

# Прямое преобразование тепловой энергии

**Эффект Зеебека:** термоЭДС в электрической цепи из материалов с различной концентрацией носителей заряда, соединения которых имеют различные  $T$ .

Вариант полупроводника –  $Bi_2Te_3$ , постоянная Зеебека  $3.14 \cdot 10^{-4} \text{ В/К}$  (для металлических термопар – в 1000 раз ниже).

## Преимущества:

- сравнительно высокий КПД
- минимизация потерь на собственные нужды станции

## Недостатки:

- высокая стоимость материалов (делает стоимость энергии до \$1/кВтч)
- необходимость изоляции полупроводников от морской воды
- изоляция приводит к дальнейшему удорожанию и уменьшению КПД

## Перспективы

ОТЭС, созданные на таком принципе, можно применить для обеспечения электричеством комплексов подводной добычи полезных ископаемых.

# Экономические характеристики

## Мощность и удельная стоимость разработки энергетических ресурсов мирового океана

Источник энергии	Мощность, ГВт	Стоимость производства, цент/кВт·ч
Градиент температуры	10000	4-7
Ветровые волны	500	11-24
Морские течения	69	13-22
Океанские ветры	170	5-9
Перепады солености	3500	14-29
Биомасса	770	11-15
Приливы	не менее 10000	1.5-30

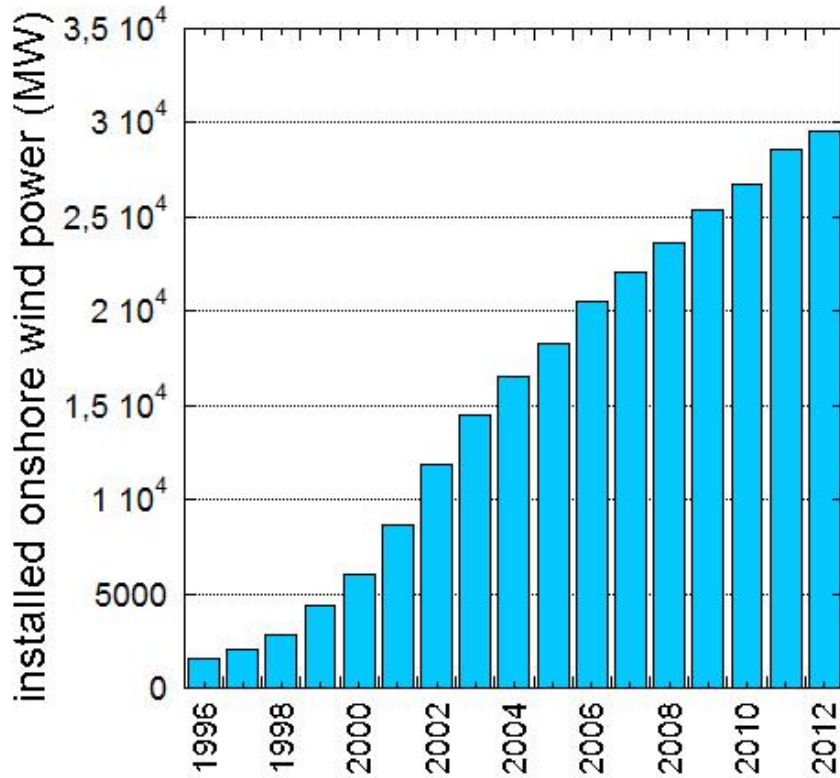
- Для сравнения: себестоимость энергии ГЭС – 0.2-3 цент/кВт·ч, АЭС – 2- 9 цент/кВт·ч, ТЭС – 4-12 цент/кВт·ч.
- Большинство методов выгодно лишь в сравнении с ДЭС на привозном топливе (50-100 цент/кВт·ч).

1. Состояние альтернативных источников в мировой энергетике
2. Энергия ветра
3. Биоэнергия
4. Энергия Солнца
5. Геотермальная энергия
6. Энергия океана
7. Пример: Альтернативная энергетика в Германии
8. Дополнительная информация



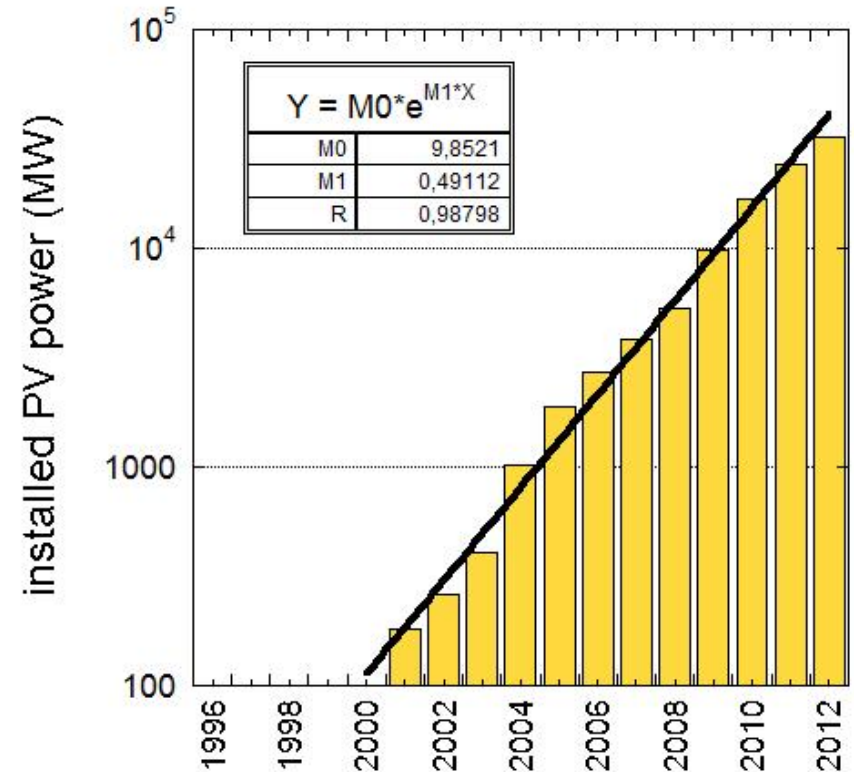
# Пример: Альтернативная энергетика в Германии

## Сухопутные ветроэлектростанции



Линейный рост, выходит на насыщение

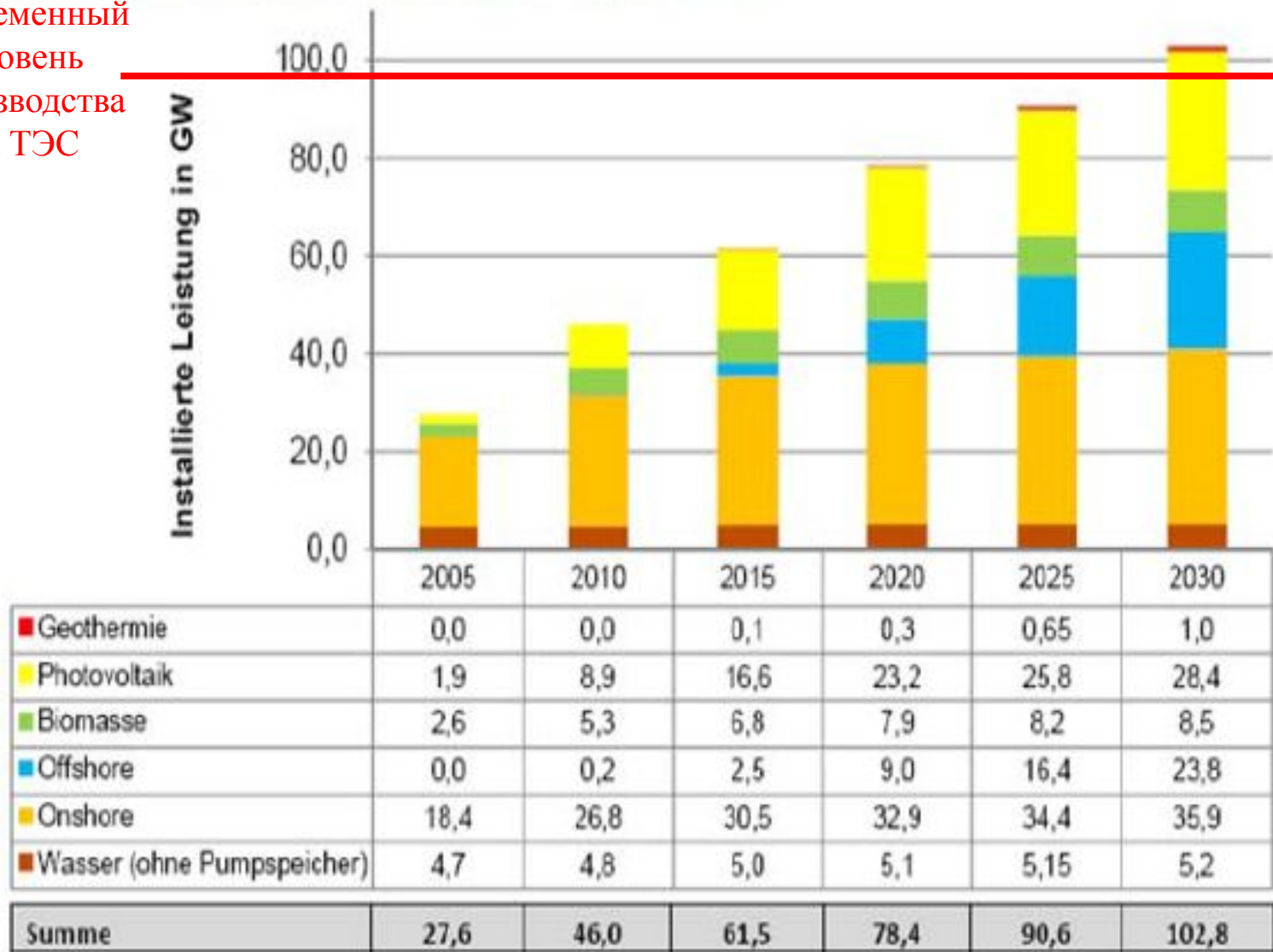
## Солнечные батареи



Экспоненциальный рост

# План развития возобновляемых источников

Современный  
уровень  
производства  
на ТЭС



Quelle: Leitszenario 2009 (BMU 2009).

# Источники электроэнергии в Германии, 2010 г.

Источник	ТВтч	%
Каменный уголь	105,8	18
Бурый уголь	135,2	23
Уран	135,2	23
Природный газ	82,3	14
Ветер	35,3	6
Солнечные батареи	11,8	2
Биогаз	35,3	6
Гидроэнергия	17,6	3
Нефть и пр.	29,4	5

Полное годовое производство электричества – 588 ТВтч.

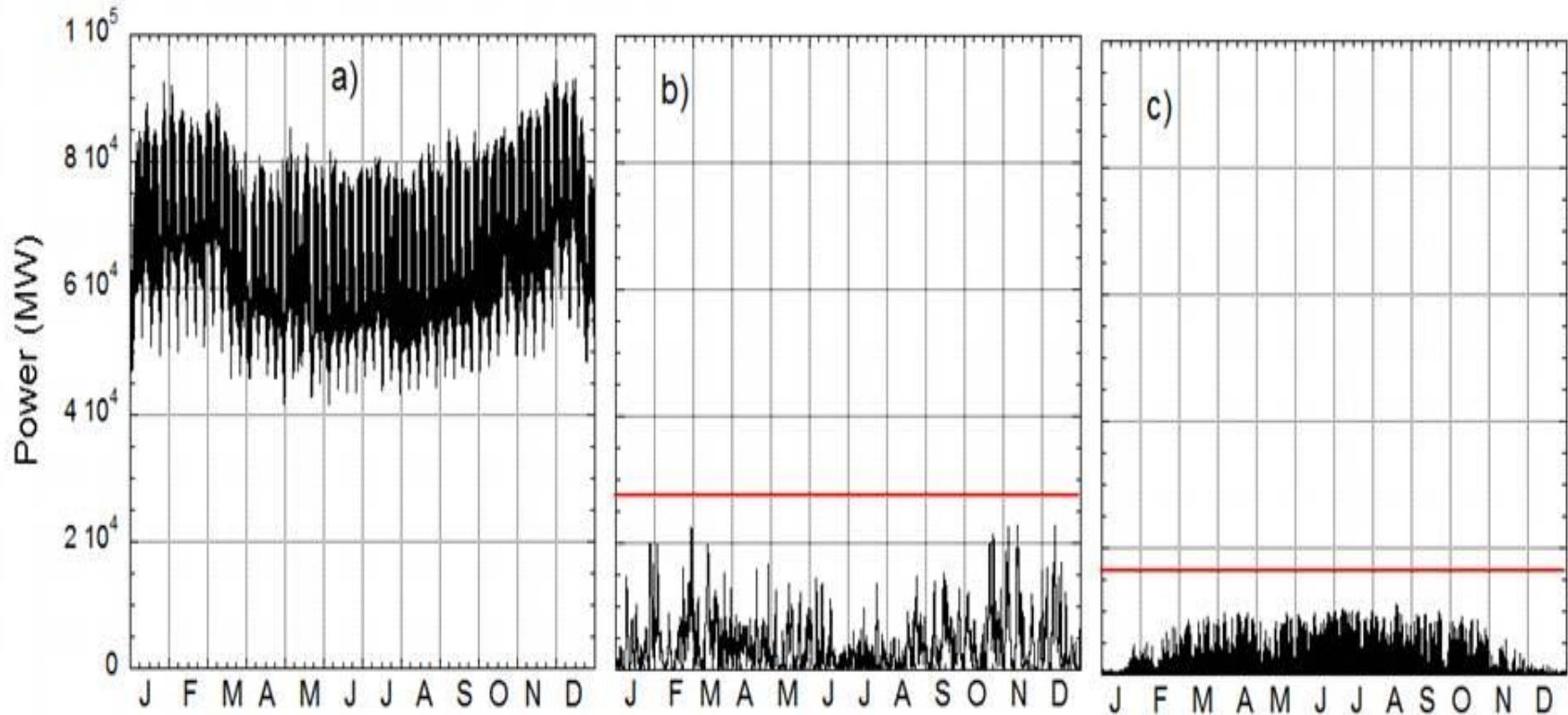
Несмотря на правительственную программу поддержки возобновляемых источников, на ТЭС производят 60% электроэнергии

# Потребление и производство электричества, 2010

Нагрузка

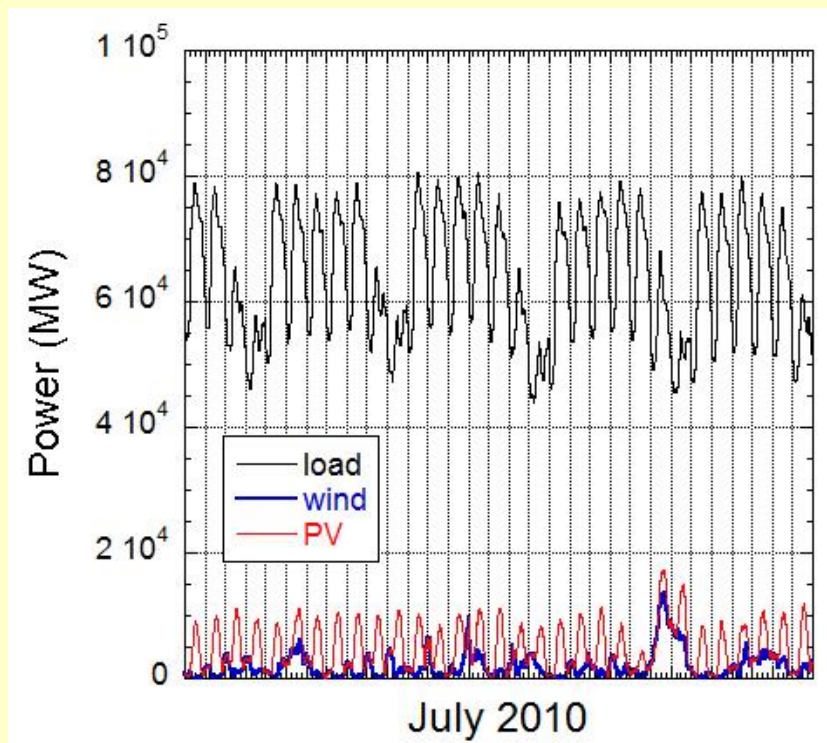
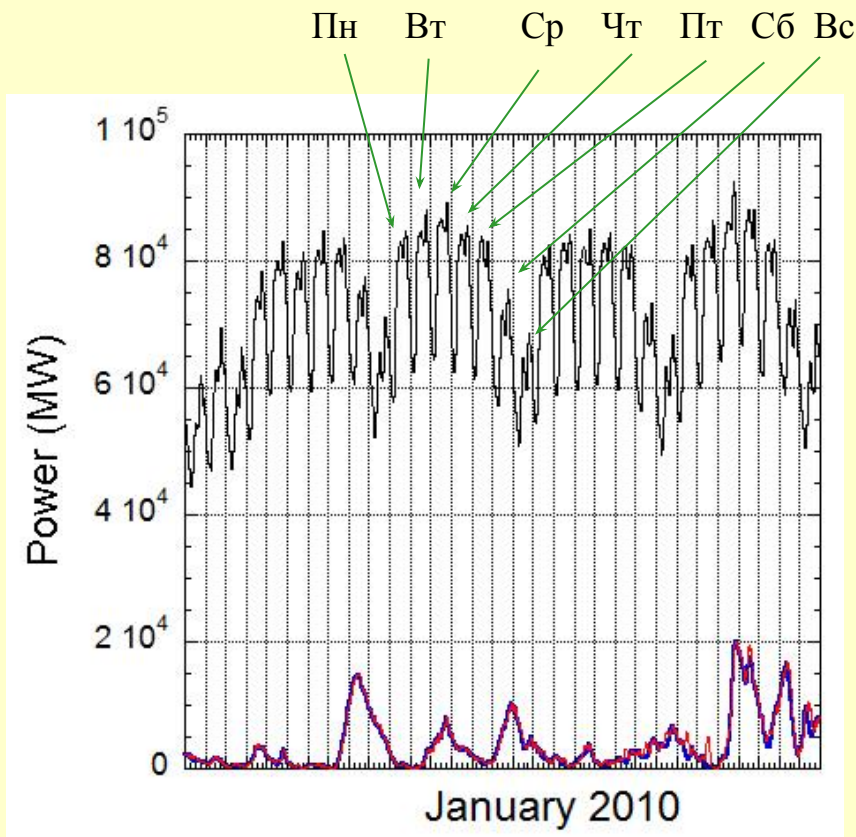
Ветроэлектростанции

Солнечные батареи



- Красными линиями показаны уровни установленной мощности ветроэлектростанций и солнечных батарей.
- Видно, что реальная выработка заметно ниже установленной мощности!

# Детализация потребления и производства

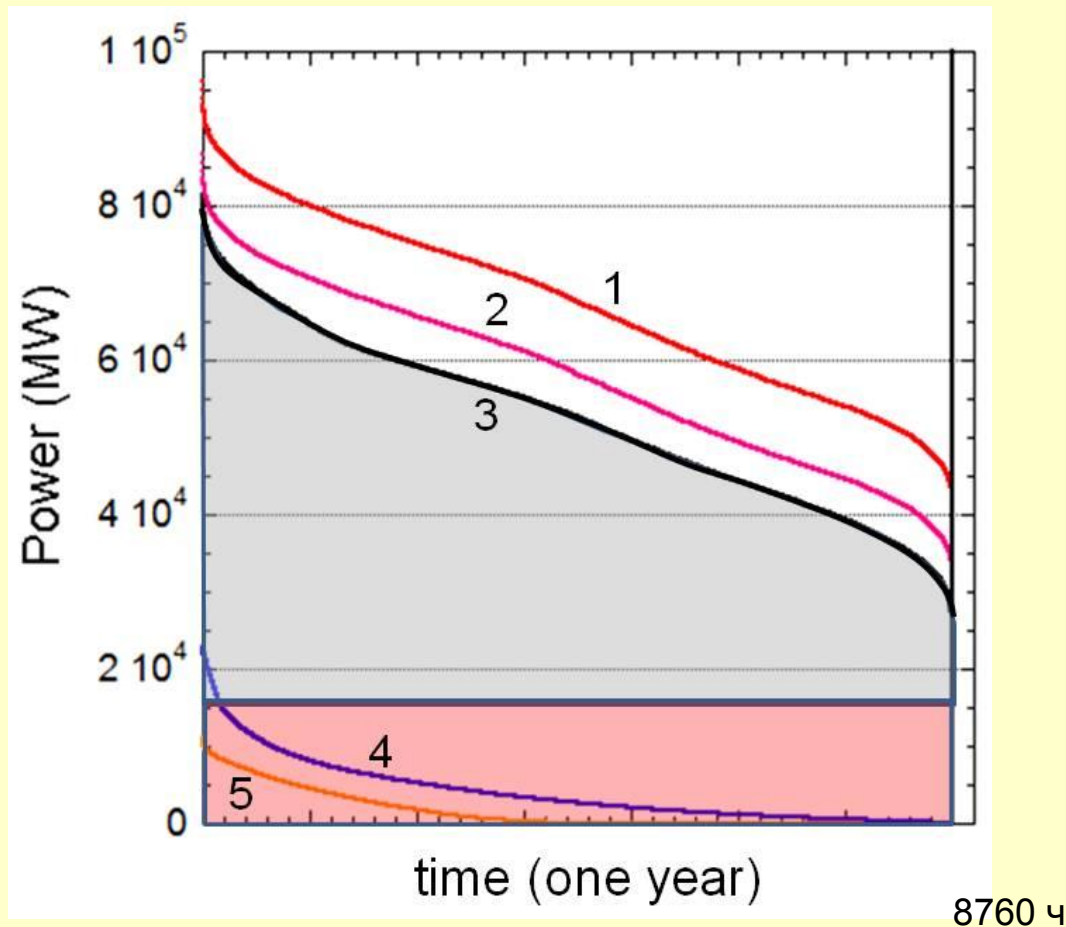


- Черные графики – потребление, синие – производство ВЭС, красные – суммарное производство ВЭС и солнечных электростанций.
- Налицо сильная неравномерность на масштабах как года, так и суток.



# Анализ потребления по длительности

Большая мощность обычно требуется на довольно небольшой срок.



1 – запрашиваемая нагрузка; 2 – она же без уровня вклада ГЭС и биогаза; 3 – она же без вклада ВЭС (4) и СЭС (5). Горизонтальная линия – вклад АЭС; серая площадь показывает вклад ТЭС.



# Выводы

- Видно, что на настоящий момент доля альтернативной энергетики весьма мала (всего 2.5%).
- В ближайшем будущем альтернативная энергетика не сможет заменить собой классические источники энергии.
- Большинство АИЭ не могут работать равномерно по времени, как классическая энергетика.
- Предлагается снижать общее потребление за счет более эффективного использования энергии. Это позволит поднять долю АИЭ.
- Часть АИЭ приближаются к насыщению: например, невозможно засадить все поля кукурузой под биоэтанол.
- Использование некоторых АИЭ само приводит к нарушению экологической ситуации (например, производство фотоэлементов).
- Без поддержки со стороны государства часть проектов АИЭ при нынешних ценах на энергоресурсы не являются самокупаемыми.
- АИЭ надо развивать, потому что их роль будет расти по мере исчерпания традиционных источников. Пример – Германия!!!

1. Состояние альтернативных источников в мировой энергетике
2. Энергия ветра
3. Биоэнергия
4. Энергия Солнца
5. Геотермальная энергия
6. Энергия океана
7. Пример: Альтернативная энергетика в Германии
8. Дополнительная информация

# Навоз – основное сырье для биореакторов

В навозе заключена почти половина энергии, поступающей на ферму с кормами!

**«Производство» навоза** на современной свиноферме > 50 т/день. Свиной и птичий навоз необходимо выдерживать для уничтожения патогенных микробов, яиц гельминтов и семян сорняков => огромные хранилища  $\sim 10^5$  м<sup>3</sup> – невыгодно.

*Компостирование – разложение под действием аэробных бактерий, в результате чего происходит естественное обеззараживание под влиянием разогрева до 60°C с рассеиванием тепла, потерями азота и фосфора. Для жидкого навоза неприменим.*

**Природный биореактор** – коровий желудок. Анаэробные бактерии расщепляют клетчатку и вырабатывают из нее низкомолекулярные вещества, которые служат субстратом для других микробов, которые превращают их в CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>.

*Одна корова производит в сутки до 500 литров метана; 25% общей продукции метана на Земле имеет такое "животное" происхождение.*

**Подобные анаэробные бактерии** работают в биореакторе. Процесс медленнее, чем компостирование, но из сырья не уходят азот, фосфор, не рассеивается тепло.

**Конечные продукты** – биогаз, содержащий 55-75 % CH<sub>4</sub> (теплота сгорания 1 м<sup>3</sup> = теплоте сгорания 1 кг каменного угля), и качественное удобрение.

# Работа биореактора

Переработка навоза идет в бескислородных условиях при температуре 30 (мезофильные) или 50°C (термофильные бактерии).

Длительность переработки для обеззараживания навоза – не менее 12 суток. После этого компост выгружается, загружается новый субстрат.

Масса субстрата практически не изменяется, если не считать испаряемой воды, которая переходит в биогаз. Органическое вещество навоза разлагается на 30- 40 %; деструкции подвергаются в основном легко разлагаемые соединения – жир, белки, углеводы, а целлюлоза сохраняется полностью.

Получаемый биогаз плотностью 1.2 кг/м<sup>3</sup> (0.93 плотности воздуха) имеет следующий состав (%): CH<sub>4</sub> – 65±10, CO<sub>2</sub> – 34 ±10, сопутствующие газы - до 1 (в том числе сероводород - до 0.1).

Содержание воды в биогазе при 40°C – 50 г/м<sup>3</sup>, поэтому необходима осушка газа (например, удаление конденсата после охлаждения).

Давление газа, получаемого в биореакторе (1-3·10<sup>3</sup> Па), достаточно для его подачи на расстояние до 0.5 км без компрессоров.

# Пиролиз

**Пиролиз** – нагрев с частичным сжиганием. Известен с древности (из неделовой древесины получали древесный уголь и деготь). Сырье – древесина, биомасса, мусор, уголь.

**Газификация** – это пиролиз, приспособленный для максимального получения производного газообразного топлива. Устройства для газификации - **газогенераторы**.

$$\text{КПД пиролиза} = \frac{Q_{\text{сгорания производного топлива}}}{Q_{\text{сгорания используемой биомассы}}} = 80-90\%$$

Разновидности топлива, получаемого в результате пиролиза, обладают *меньшей (на 10-20%)* по сравнению с исходной биомассой суммарной *энергией сгорания*, но отличаются *большой универсальностью применения*.

Получают древесный уголь, смолы, ацетон, метан, эфиры, сырье для синтеза спиртов...

# Пример использования продуктов пиролиза

В СССР в 1938-1950 годах производилась газогенераторная версия «полторки» - ГАЗ-42. Топливо – генераторный газ, получаемый из угля, торфа, дров, брикетов сгораемых отходов (опилки, угольная пыль). Аналогичные машины производились и в Германии, на 1941 г в эксплуатации их было около 300 тыс., в основном на брикетах угольной пыли из Рура.



## ТТХ ГАЗ-42 в сравнении с прототипом (ГАЗ-АА-ММ):

грузоподъемность – 1200 кг / 1500 кг (потеря за счет массы установки),  
мощность – 30 л.с. / 50 л.с., скорость – 50 км/ч / 70 км/ч,  
расход на 100 км – 80 кг дров / 19.5 л бензина.

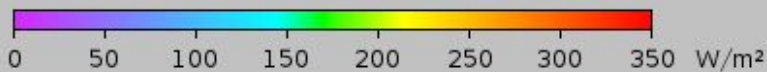
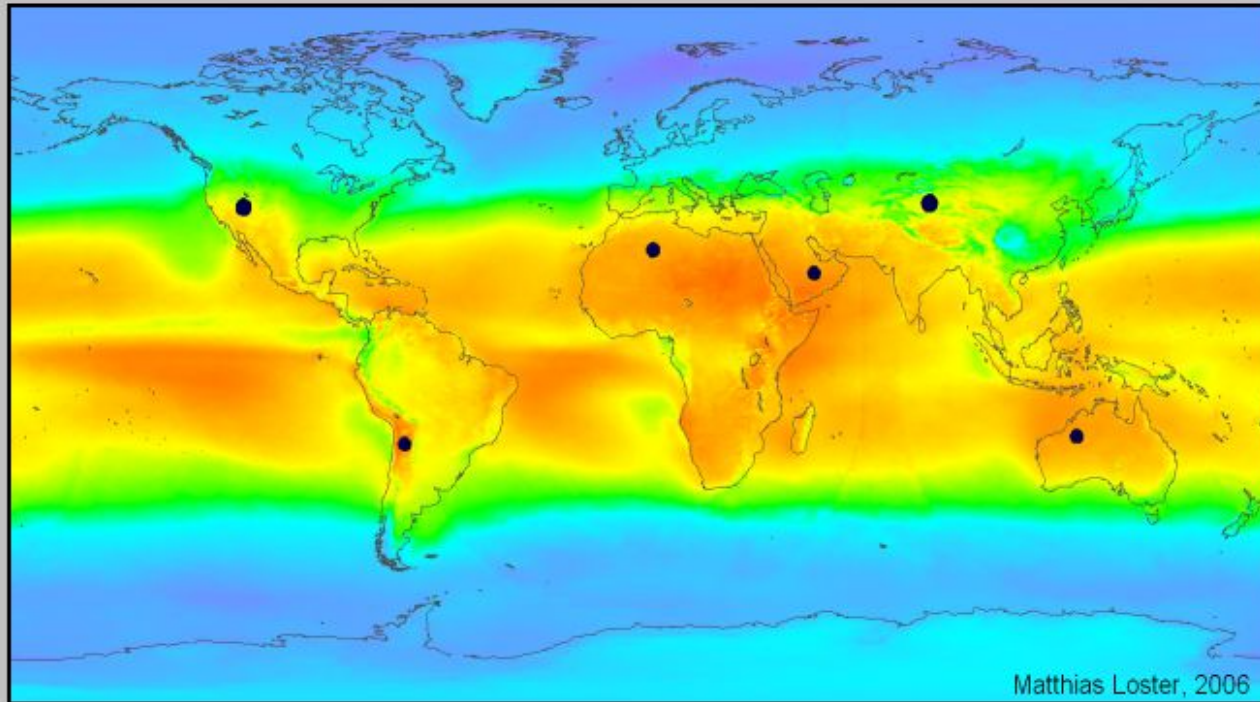
Выгода – экономия дефицитного бензина.

В настоящее время широко распространены только в Северной Корее.



# Проект мировой сети фотоэлектростанций

Плотность солнечного излучения на поверхности Земли, Вт/м<sup>2</sup>



$\Sigma \bullet = 18 \text{ TWe}$

Если расположить 6 фотоэлектрических электростанций в 6 точках, отмеченных на карте, то они в сумме дадут мощность, потребляемую ныне человечеством!!!

Matthias Loster (University of California); [http://www.ez2c.de/ml/solar\\_land\\_area/](http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/)

# Проект мировой сети фотоэлектростанций (1)

***6 пустынь – 6 станций!***

Пустыня	плотность света, <i>Вт/м<sup>2</sup></i>	площадь пустыни, <i>км<sup>2</sup></i>	площадь станции, <i>км<sup>2</sup></i>
Сахара	260	9100000	14400
Грейт Сэнди	265	400000	14200
Такла Махан	210	300000	17900
Аравийская	270	2600000	13900
Атакама	275	140000	13600
Грейт Бэзин	220	500000	17000

Суммарно станции обеспечат 18 ТВт электроэнергии и покроют планируемые даже к 2040 г потребности человечества

# Космические солнечные системы

Огромное количество солнечной энергии, приходящей на Землю ( $\sim 0.15 \text{ МВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  в год), затруднительно использовать из-за низкой плотности солнечной радиации и зависимости ее от облачности и времени года.

В настоящее время имеются технические возможности для создания фотоэлектрических ЭС, размещаемых на искусственных спутниках Земли с геостационарной орбитой. В этом случае солнечная энергия будет аккумулироваться непрерывно. Передача энергии на Землю должна осуществляться по сверхвысокочастотному каналу с длиной волны 10 см (частота 2,4 ГГц).

Расчетные значения КПД преобразования энергии на космических солнечных электростанциях (КСЭС) приведены в таблице.

Крюков А.В. Общая энергетика. Часть 2. Иркутск, ИрИИТ, 2000

# Расчетные показатели КСЭС

№	Производство и передача ЭЭ	КПД	
		достигнутые в настоящее время	перспектив -ные
1	Генерация УКВ потока энергии	76,7	90
2	Передача энергии с выхода генератора на вход антенны	94	95
3	Улавливание и детектирование	64	90
4	Общий КПД	26,5	77

КСЭС спроектированы на электрическую мощность 3-20 ГВт. Размеры КСЭС с выходной мощностью 5 ГВт оцениваются так:

- суммарная поверхность батареи ..... 20 км<sup>2</sup>;
- диаметр передающей антенны ..... 1 км<sup>2</sup>;
- диаметр приемной антенны ..... 7-12 км.

# Хранение энергии в расплавах солей

- Солнечная энергия может быть запасена в виде нагретого вещества расплавов солей, например,  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{KNO}_3$
- Соли являются эффективным теплоносителем из-за своей невоспламеняемости, нетоксичности, дешевизны, большой теплоемкости. Рабочие температуры такой системы близки к рабочим температурам пара в тепловой электростанции, что не требует экзотических рабочих тел (как аммиак в ОТЭС).
- Система на основе расплава солей состоит из солевого контура, подключенного к изолированному теплохранилищу. Во время нагревательного цикла соли нагреваются с  $\sim 300^\circ\text{C}$  до  $\sim 550^\circ\text{C}$ . Во время цикла получения мощности солевой контур испаряет воду, пар которой вращает турбину генератора.
- На Solar Two этот метод позволяет запасти  $1.44 \text{ ТДж}$  в хранилище  $68 \text{ м}^3$  с потерями всего  $\sim 1\%$

# Использование теплоты фазового перехода

Еще один тип аккумуляторов тепла основан на использовании теплоты фазового перехода. Используются как органические (парафины, жирные кислоты), так и неорганические (соли, металлы). В основном они используются для получения только тепла, а не электричества.

Система с применением парафина состоит из нагреваемого солнечным светом водяного контура, проходящего через танк с парафином. Во время цикла запасения энергии горячая вода расплавляет парафин. Удельная теплота плавления парафина –  $230 \text{ кДж/кг}$ . Во время нагревательного цикла это тепло отдается танком при застывании парафина. Таким образом можно нагреть воду для горячего водоснабжения.

Эвтектические соли типа глауберовой могут быть использованы таким же образом. При относительной дешевизне ее удельная теплота плавления составляет  $347 \text{ кДж/кг}$ . Впервые такая система была применена для обогрева дома в г.Довер (Массачусетс, США) в 1948 г.

Подробнее: <http://e06.power.bmstu.ru/inc/methodiks/afp.pdf>



# Электрические аккумуляторы

Электрические аккумуляторы могут быть применены для хранения «лишнего» электричества в фотоэлектрических схемах. Системы такого типа состоят из фотоэлектрического источника напряжения, соединенного с аккумуляторной батареей через устройство контроля заряда.

Наиболее распространенным типом батарей, используемых в подобных схемах, являются свинцово-кислотные аккумуляторы. Они характеризуются плотностью энергии *110-140 кДж/кг*, эффективностью использования заряда 70-92%, и стоимостью \$150-200 за кВт·ч (\$45-\$55 за МДж).

При подборе аккумуляторов для солнечной электростанции необходимо рассчитывать их емкость на 3-5 дней энергопотребления в условиях непогоды.

Современные аккумуляторы могут работать на протяжении 25000 циклов перезарядки.

# Совмещение с водородной энергетикой

**Водородная энергетика** — экономичное и экологичное направление выработки и потребления энергии человечеством, основанное на использовании водорода в качестве средства для аккумулирования, транспортировки и потребления энергии. При сгорании водорода образуется вода.

Необходимо получение водорода в промышленных количествах.

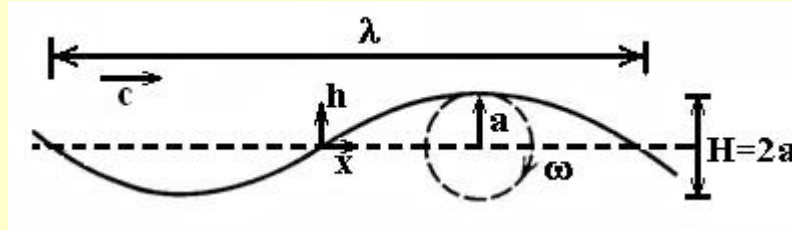
С помощью энергии, получаемой с солнечной электростанции, можно, например, производить электролиз воды. Полученный водород может быть запасен, как любое другое газообразное топливо.

Минус – процесс весьма дорогостоящ, себестоимость – около \$3 за литр бензинового эквивалента (34.5 МДж) при использовании солнечной энергетике.

# Теория преобразования энергии волн

Мощность волн на глубокой ( $D > \lambda/2$ ) воде  $\sim$  периоду  $T$  и квадрату амплитуды  $a$ .

Редкие ( $T \approx 10$  с) волны большой амплитуды ( $a \approx 2$  м) дают  $\leq 70$  кВт на метр фронта



Характерные особенности поверхностных волн на глубокой воде:

- Нераспадающиеся синусоидальные с нерегулярной длиной, фазой, направлением
- Амплитуда движения частиц экспоненциально спадает с глубиной
- $a$  не зависит от  $\lambda$ ,  $c$ ,  $T$ , а лишь от характера взаимодействия ветра и воды
- Нет поступательного движения воды – частицы движутся по кругу радиусом  $a$ .

## Основные соотношения

$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2}; \quad T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}; \quad \text{фазовая скорость } c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$$

Мощность, переносимая в направлении  $x$  на ширину волнового фронта  $P' = \frac{\rho a^2 g^2 T}{8\pi}$

На практике – нерегулярные волны, а не сумма волн в одном направлении; извлекаемая направленным преобразователем мощность  $\sim 0.5-0.9$  переносимой волнами

# Основы теории приливной энергетики

Бассейн площадью  $A$

Наполняется при приливе

Опустошается через турбину

Высота прилива  $R$

Центр тяжести воды на  $R/2$

Максимальная энергия

падения воды  $E = (\rho AR)gR/2$

Средняя потенциальная мощность за период прилива  $W = E/\tau$

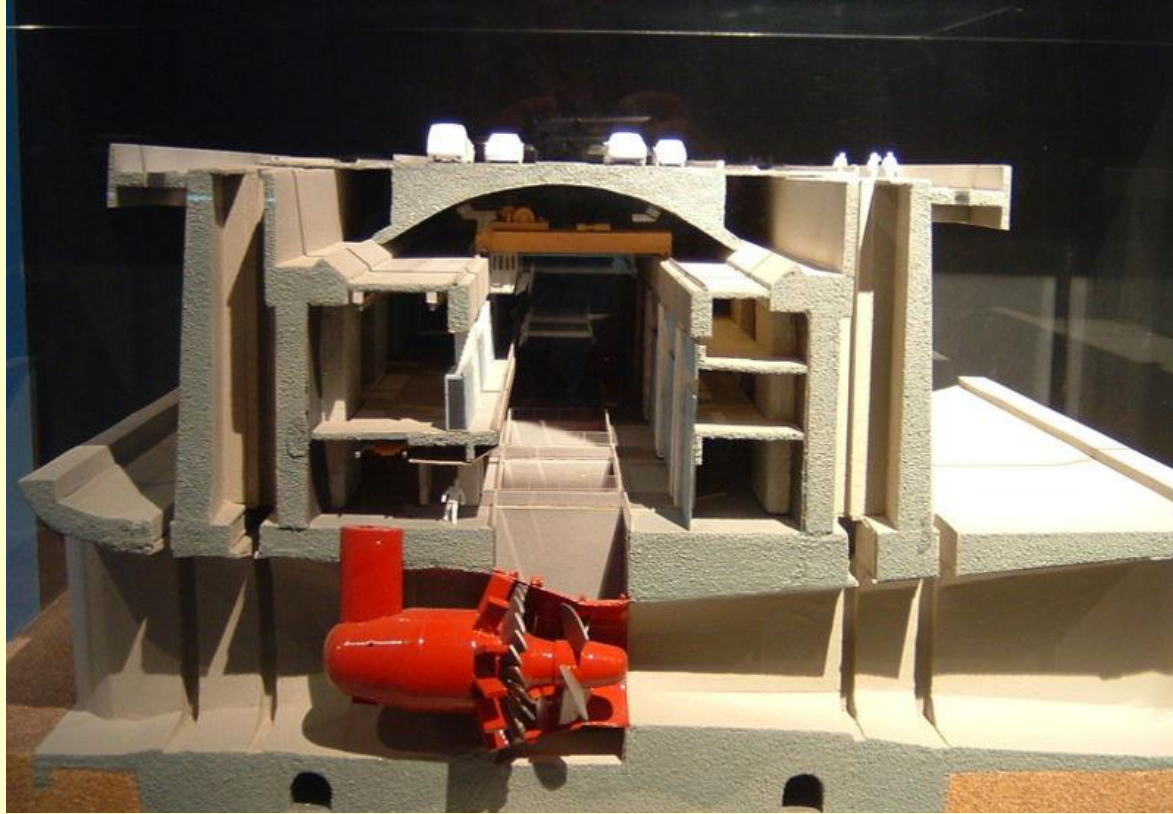


**На практике** наблюдаются следующие **проблемы**:

- Часть потенциальной энергии (при низкой воде) не может быть преобразована
- Необходимы специальные (реверсивные) турбины под условия ПЭС
- Невозможно обеспечить равномерную выработку электроэнергии

Реально ПЭС может работать и при наполнении бассейна с реверсивной турбиной. При оптимизации можно перерабатывать до **90%** потенциальной энергии прилива

# Макет приливной станции в Рансе



Крупнейшая в Европе: снимаемая мощность – **240 МВт** (24 турбины). Дамба 750 м, площадь бассейна 22.5км<sup>2</sup>. Стоимость строительства – 100 млн. €, окупилось за 15 лет, стоимость энергии – 0.018 €/кВт·ч (на АЭС Франции – 0.025 €/кВт·ч)

Крупнейшая в мире – Сихва, Ю.Корея, запущена в 2011 г. **254 МВт**. Стоимость: \$646 млн – дамба, \$382 млн – все остальное.

# ПЭС в России

Кислая Губа, Мурманская обл. Построена в 1968 году, 1 генератор производства Франции работал до 1994 г. для исследования возможности применения французского опыта в наших условиях (возможное сильное обледенение). Открыта снова в 2004, 2 агрегата «ПО Севмаш»: **200 кВт** и **1.5 МВт**.

## Места возможного строительства ПЭС в России

Месторасположение	Средняя высота прилива, м	Площадь бассейна, км <sup>2</sup>	Потенциал	
			Средняя мощность, ГВт	Годовая выработка, ТВт·ч
Мезенский залив	6.0	2330	15.2	50.0
Пенжинская губа	6.2	20530	87.4	190.0
Тугурский залив	4.7	1800	10.3	27.6

Разработаны проекты для Охотского моря: Тугурская ПЭС (**8 ГВт**, срок строительства – 11 лет, стоимость - ~\$1100/кВт (столько же, сколько и на сложную ГЭС), срок окупаемости – 8 лет.); Пенжинская ПЭС (могла быть крупнейшей в мире, **87 ГВт** – приливы 5-13 метров, суточный проход воды 360-530 км<sup>3</sup> – 20-30 Амазонок). Проекты заморожены в 1990-х. Поведение и параметры приливов хорошо известны благодаря навигации. Поэтому **приливная энергия** – надежная форма возобновляемой энергии.

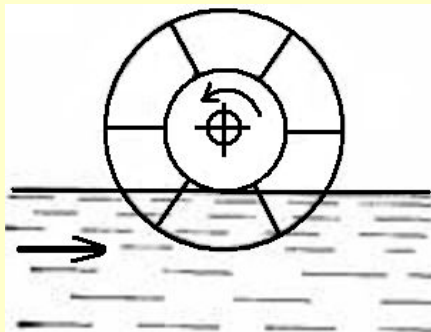
### Проблемы:

Технические сложности и большие финансовые затраты  
Потенциальные нарушения экосистемы  
Недостаток потребителей по размещению в России (Север, Дальний Восток)



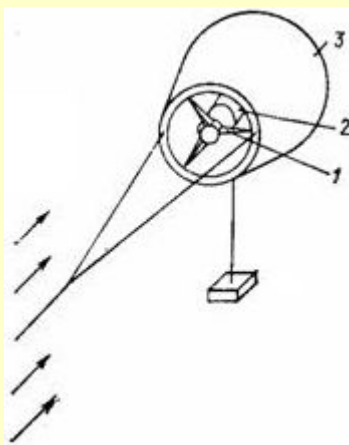
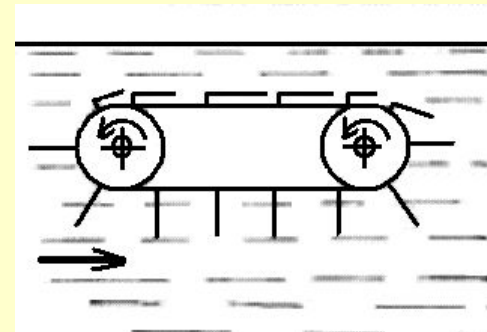
# Общая характеристика технических решений

Преобразователи энергии течений: а) напор  $\Rightarrow$  вращение, б) прочие решения



## Водяное колесо и его

разновидности: надводное и подводное, простое и ленточное, оптимизированное по форме лопастей и холостому ходу, и т.д.



Рабочее колесо с горизонтальной осью в насадке – наиболее перспективно. Насадка (3) уменьшает возмущение потока в целом и турбулентность внутри себя. Увеличение размеров крыла – критично разрушение давлением потока, а не собственным весом. Тестовый экземпляр уже работает. Оценка размера предполагаемых турбин: диаметр **200м** (стадион на 20000 зрителей) на **700 МВт** – могут быть построены уже сейчас!

Прочие решения: например, сопло Вентури (водный поток подхватывается течением и затем направляется на турбину)

Другие источники: например, океанские водовороты. Постоянный вихрь у Огасавара (Япония): диаметр **200 км** на глубину до **3 км**. Удельные энергетические характеристики его лучше, чем у течений!