



Институт физики, нанотехнологий и
телекоммуникаций СПбГПУ

Владимир Юрьевич Сергеев

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

Задачи курса

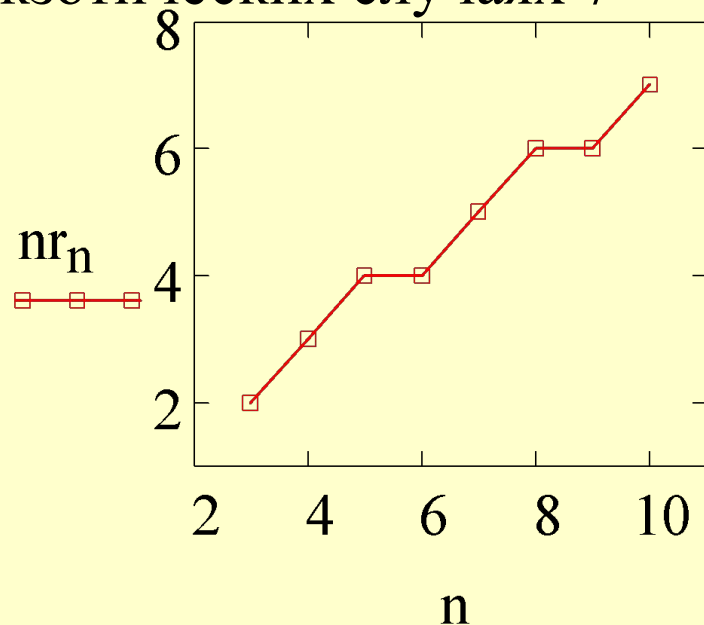
- Целью настоящего курса является систематизация уже полученных ранее и приобретение новых знаний в области современных методов получения, преобразования, накопления и использования энергии:
 - Знание физических законов, лежащих в основе современной и будущей энергетики
 - Понимание физических основ и технических реализаций способов и методов, используемых в энергетике
 - Знание экономической, технологической и экологической привлекательности различных методов современной и будущей энергетики
- Ожидается, что слушатели должны ориентироваться в стратегии и тенденциях развития мировой энергетики

Структура курса

- Введение. Классификация видов энергии. Современное состояние использования энергии в мире и перспективы
- Теплоэлектростанции традиционной энергетики и гидроэнергетика
- Физика ядерного реактора деления
- Энергетические ресурсы океана, энергия ветра и геотермальная энергия. Использование биотоплива в энергетических целях
- Фотоэлектрическое и фотокаталитическое преобразование солнечной энергии, МГД, термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи энергии
- Ядерный синтез – энергетика будущего (2 лекции)
- Водородная энергетика. Стратегия развития мировой энергетики

Как будет проходить зачет

- Будут розданы вопросы, дополнительные вопросы и пример задач
- В билетах будет 2 вопроса и 1 задача.
- В случае успешного ответа на вопросы и правильного решения задачи – будут заданы “ n ” = (3-7) простых дополнительных вопросов, зачет ставиться при доле правильных ответов, равной или превышающей $2/3$.
- В особенно экзотических случаях $n \rightarrow \infty$



План

1. Виды взаимодействия и их использование в энергетике.
2. Возобновляемые (ВИЭ) и невозобновляемые (НИЭ) источники энергии.
3. Структура выработки и потребления энергии на примере США.
4. Особенности мирового производства и потребления энергии.
5. Результаты прогнозов изменения населения и необходимой энергии в мире.
6. Анализ разведанных запасов источников энергии.
7. Энергетические перспективы различных источников энергии.
8. Экологические аспекты различных источников энергии.
9. Анализ сценариев развития мировой энергетики.

- **Виды взаимодействия и их использование в энергетике.**
- Возобновляемые (ВИЭ) и невозобновляемые (НИЭ) источники энергии.
- Структура выработки и потребления энергии на примере США.
- Особенности мирового производства и потребления энергии.
- Результаты прогнозов изменения населения и необходимой энергии в мире.
- Анализ разведанных запасов источников энергии.
- Энергетические перспективы различных источников энергии.
- Экологические аспекты различных источников энергии.
- Анализ сценариев развития мировой энергетики.

Виды взаимодействия и их использование в энергетике

- Гравитационное (притяжение Земли и космических объектов – *гидроэнергетика, приливная энергетика*)
- Электромагнитное (взаимодействие заряженных частиц, электромагнитных волн – *тепловая энергетика, солнечная энергетика, ветроэнергетика, биоэнергетика*)
- Слабое (бета-распад и другие явления обмена между лептонами и кварками – *пока не используется*)
- Сильное (притяжение между нуклонами в ядрах – *ядерная энергетика*)

Это фундаментальные взаимодействия – различные, не сводящиеся друг к другу типы взаимодействия элементарных частиц и составленных из них тел.

Истинное уравнение единого поля

- В настоящее время создается единая теория фундаментальных взаимодействий. Пока фундаментальные взаимодействия описываются двумя общепринятыми теориями: общей теорией относительности и «Стандартной Моделью», описывающей электромагнитное, слабые и сильное взаимодействия. Полного объединения теорий пока достичь не удалось из-за трудностей создания квантовой теории гравитации.
- Производившиеся за последние 15-20 лет астрофизические наблюдения свидетельствуют, что или ОТО неверна на масштабах Вселенной, или надо вводить новые виды материи и энергии (темная энергия и темная материя).

АНГЕЛ: Господи, они синтезировали еще один трансурановый элемент. Как будем реагировать?

БОГ: Добавим еще один нелинейный член в Истинное уравнение единого поля.

Физики смеются (Смеются не только физики), Совпадение, Москва, 2005, стр. 36.



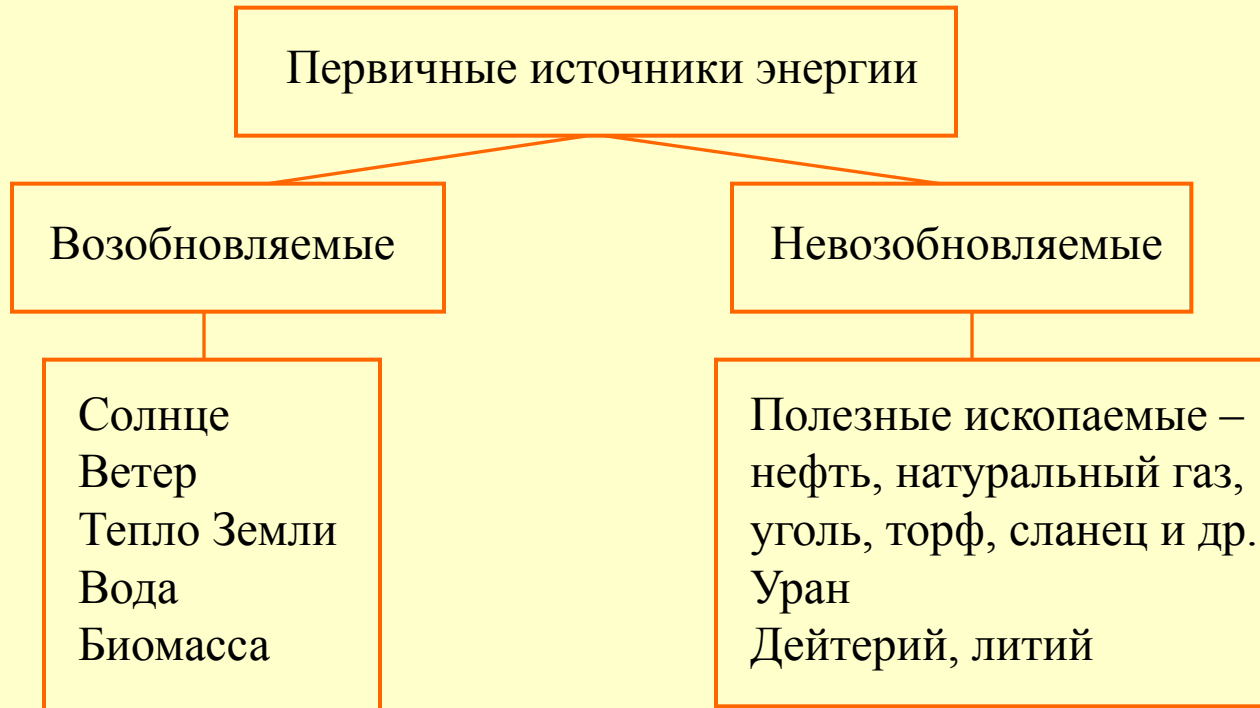
Единицы измерения энергии

- Джоуль – это один [Ньютон метр] = [килограмм метр² /секунда²]
- Калория – 4.184 Дж (нагреть 1 грамм воды на 1 градус Цельсия)
- Btu (British thermal unit) – 1055 Дж, т.е. примерно 1 кДж (нагреть 1 фунт воды на 1 градус Фаренгейта)
- 1 баррель нефти – 42 галлона (158.988 л) = 5800000 Btu
(Пересчёт добычи: в среднем баррель в сутки равен 50 тоннам в год)
- 1 тонна условного топлива – теплотворная способность 1 тонны каменного угля (29.3 ГДж)
- 1 тонна нефтяного эквивалента – теплотворная способность 1 тонны нефти (41.9 ГДж)



- Виды взаимодействия и их использование в энергетике.
- Возобновляемые (ВИЭ) и невозобновляемые (НВИЭ) источники энергии.
- Структура выработки и потребления энергии на примере США.
- Особенности мирового производства и потребления энергии.
- Результаты прогнозов изменения населения и необходимой энергии в мире.
- Анализ разведанных запасов источников энергии.
- Энергетические перспективы различных источников энергии.
- Экологические аспекты различных источников энергии.
- Анализ сценариев развития мировой энергетики.

Источники энергии



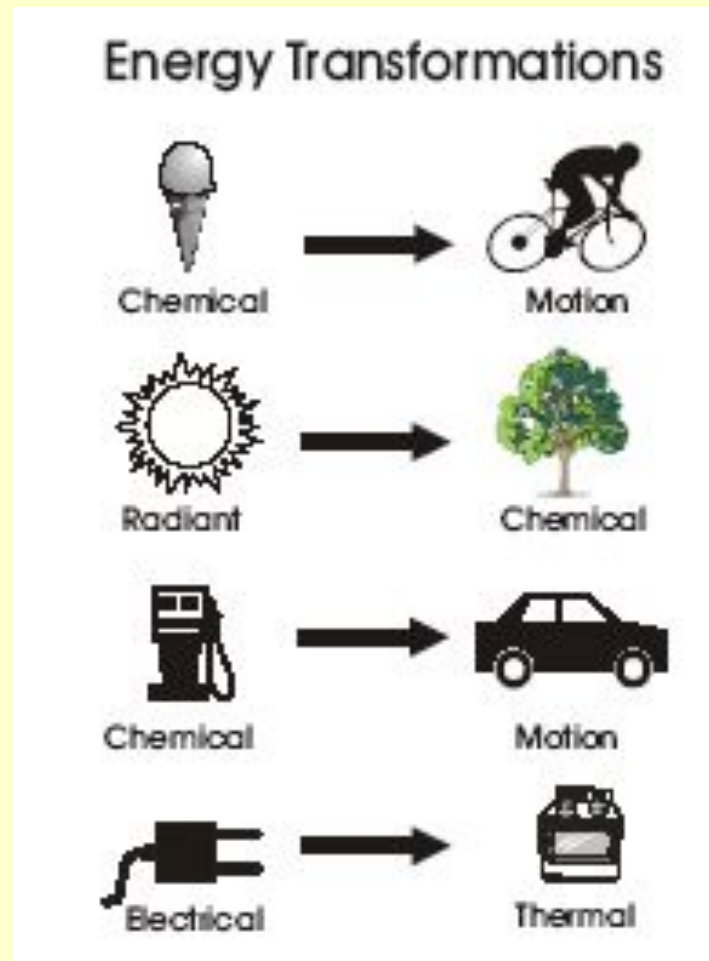
- Электричество, пар, горячая вода и др. – вторичный вид энергии, после ее преобразования из первичных источников

Трансформация форм энергии

- **Закон сохранения энергии** – энергия не исчезает, а трансформируется. Примеры на рисунке.
- **Эффективность энергии** - процент полезной энергии, которую можно взять от системы. При трансформациях потери неизбежны всегда. Пример - человек. Еда – источник энергии человеческого тела – эффективность примерно 5 процентов!
- **Вся история человечества** – это история овладения человеком источниками энергии!

Homo Sapiens ⇔ *Homo Usus*

Человек Разумный ⇔ Человек Потребляющий



- Виды взаимодействия и их использование в энергетике.
- Возобновляемые (ВИЭ) и невозобновляемые (НИЭ) источники энергии.
- Структура выработки и потребления энергии на примере США.
- Особенности мирового производства и потребления энергии.
- Результаты прогнозов изменения населения и необходимой энергии в мире.
- Анализ разведанных запасов источников энергии.
- Энергетические перспективы различных источников энергии.
- Экологические аспекты различных источников энергии.
- Анализ сценариев развития мировой энергетики.

Простейшие оценки энергопотребления

□ 1 кал = 4.18 Дж => в день человеком потребляется ~8-10 МДж

Для сравнения:

□ Приготовление чая: чайник 1 кВт, 5 мин => 300 кДж

□ Поездка на лифте: высота 5 этажей по 3 метра, 100 кг => 15 кДж

□ Работа на компьютере: 400 Вт, 8 часов => 11.5 МДж

□ Работа на токарном станке: 5 кВт 8 часов => 144 МДж

□ Троллейбус (150 кВт, 0.5 часа, 30 человек) => 9 МДж

□ Автомобиль (50 кВт, 0.5 часа, 1 человек) => 90 МДж

Вывод: Основное потребление энергии – **промышленность** и **транспорт**.

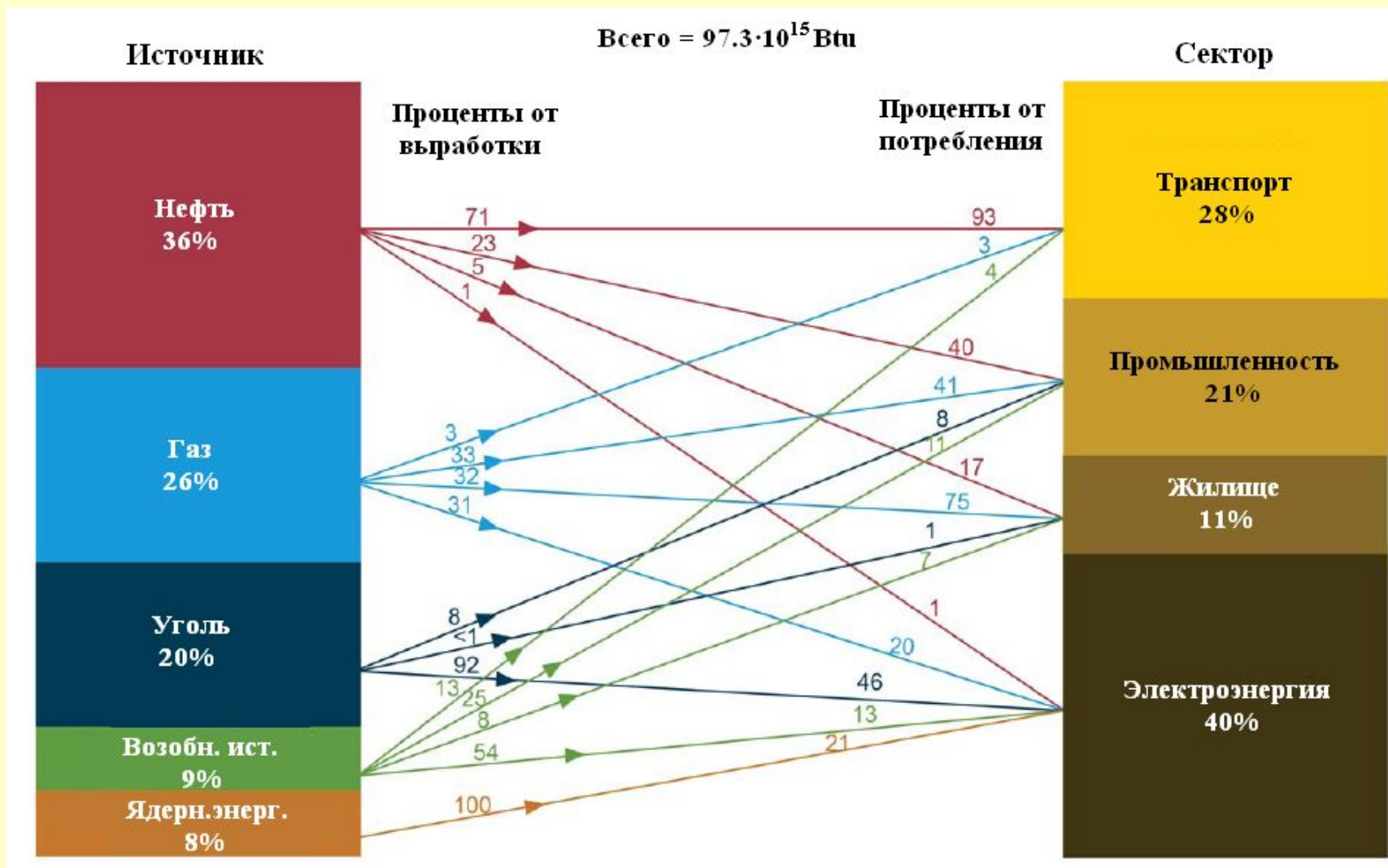
$$Q=10^{21} \text{ Дж}, 1 \text{ кВт час}=3.6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

□ На Землю ежегодно падает от Солнца $S \cong 3300 Q$ (2100 Q отражается)

□ Сейчас человечество потребляет **0.5 Q (2.2 кВт на человека)**:

$$7 \text{ млрд} \times 2.2 \text{ кВт} \times 3600 \text{ с} \times 24 \times 365 \cong 0.5 \cdot 10^{21} \text{ Дж}$$

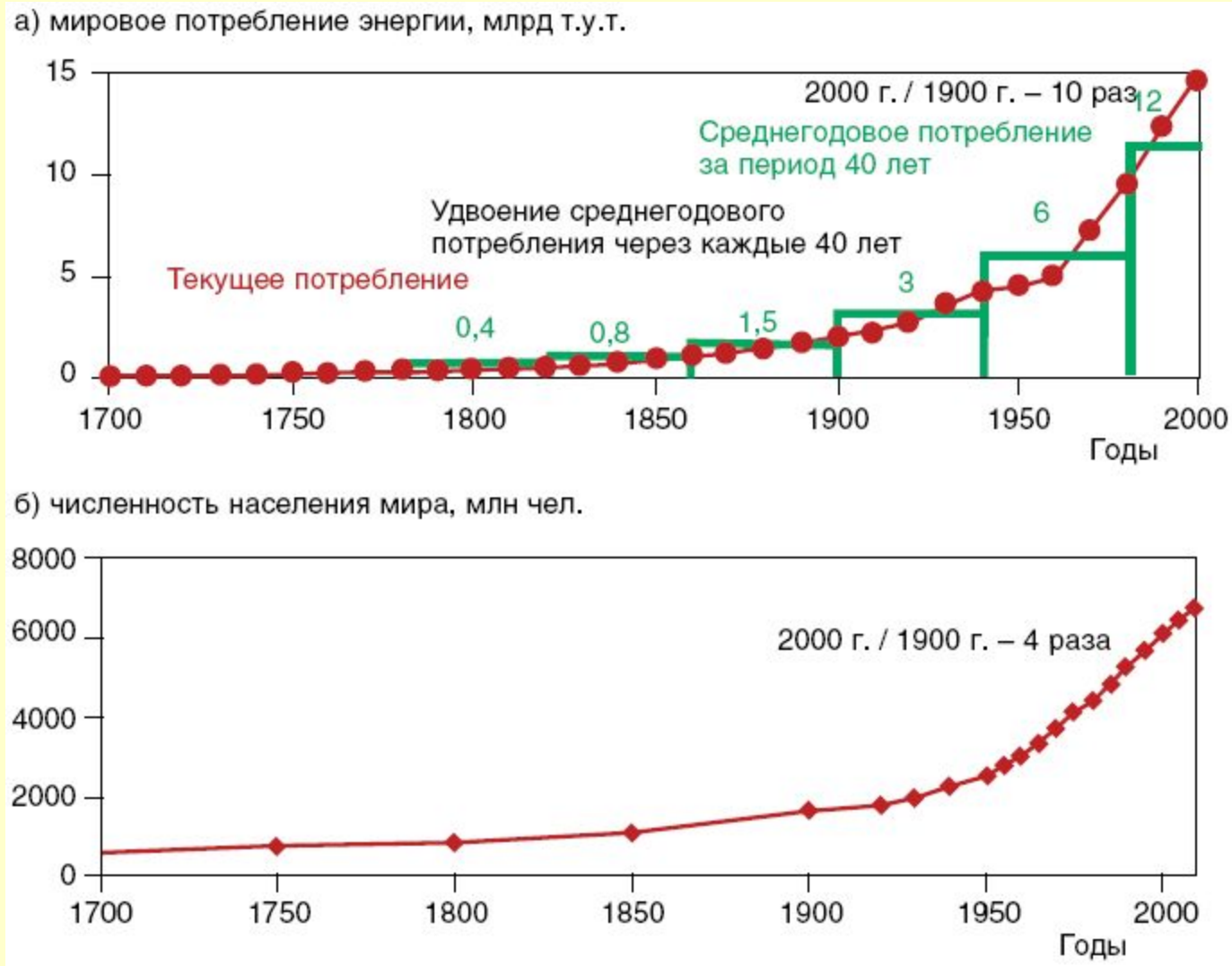
Потребление энергии в США в зависимости от источника за 2011 г. (типично для развитых стран)



US Energy Information Administration report 2012, <http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/index.cfm>

- Виды взаимодействия и их использование в энергетике.
- Возобновляемые (ВИЭ) и невозобновляемые (НИЭ) источники энергии.
- Структура выработки и потребления энергии на примере США.
- Особенности мирового производства и потребления энергии.
- Результаты прогнозов изменения населения и необходимой энергии в мире.
- Анализ разведанных запасов источников энергии.
- Энергетические перспективы различных источников энергии.
- Экологические аспекты различных источников энергии.
- Анализ сценариев развития мировой энергетики.

Сравнение роста энергопотребления и населения



□ Потребление энергии нарастает быстрее, чем население – запросы растут!

«Экономические стратегии», №12, 2011, стр.7

Потребление энергии до кризиса 2008 г.

Страны	2003	2004	Изменение в 2004 относительно 2003	↓ Доля в мировом потреблении
С Ш А	2302.3	2348.8	2.0%	22.5%
Западная Европа	1778.5	1806.7	1.5%	17.3%
Китай	1277.3	1512.5	18.4%	14.5%
Россия	644.9	651.4	1.0%	6.2%
Япония	511.0	522.4	2.2%	5.0%
Индия	317.4	345.8	8.9%	3.3%
Остальные	3118.8	3262.0	4.6%	31.2%
Мир в целом	9950.2	10449.6	5.0%	100.0%

(в млн. тонн эквивалента нефти; 1 т.э.н. ≈ 42 ГДж)

- Китай и Индия имеют высокие темпы развития!
И почти половину населения планеты!!!
- США потребляли почти четверть энергии
при населении 5% от населения планеты!!!

Потребление энергии во время кризиса 2008 г.

Страны	2007	2008	2009	Изменение в 2009 относительно 2008	Доля в мировом потреблении
С Ш А	2372.7	2320.2	2205.9	-4.9%	19.4%
Западная Европа	1791.3	1785.2	1682.0	-5.8%	14.8%
Китай	1951.0	2041.7	2210.3	8.3%	19.4%
Россия	673.8	679.3	644.4	-5.1%	5.7%
Япония	522.9	515.3	474.0	-8.0%	4.2%
Индия	415.5	445.9	487.6	9.4%	4.3%
Остальные	3620.4	3705.2	3687.1	-0.5%	32.4%
Мир в целом	11347.6	11492.8	11391.3	-0.9%	100.0%

- Индии экономический кризис 2008 года оказался не страшен для Индии (те же темпы роста), не так страшен для Китая (в два раза снизил темпы роста)! Китай уже догнал США по абсолютному потреблению энергии!
- Кризис «помогает» развитым странам реализовать планы по экономии энергии (план ЕС – снижение энергопотребления на 20% к 2020 по сравнению с 2006 годом)

Потребление энергии после кризиса 2008 г.

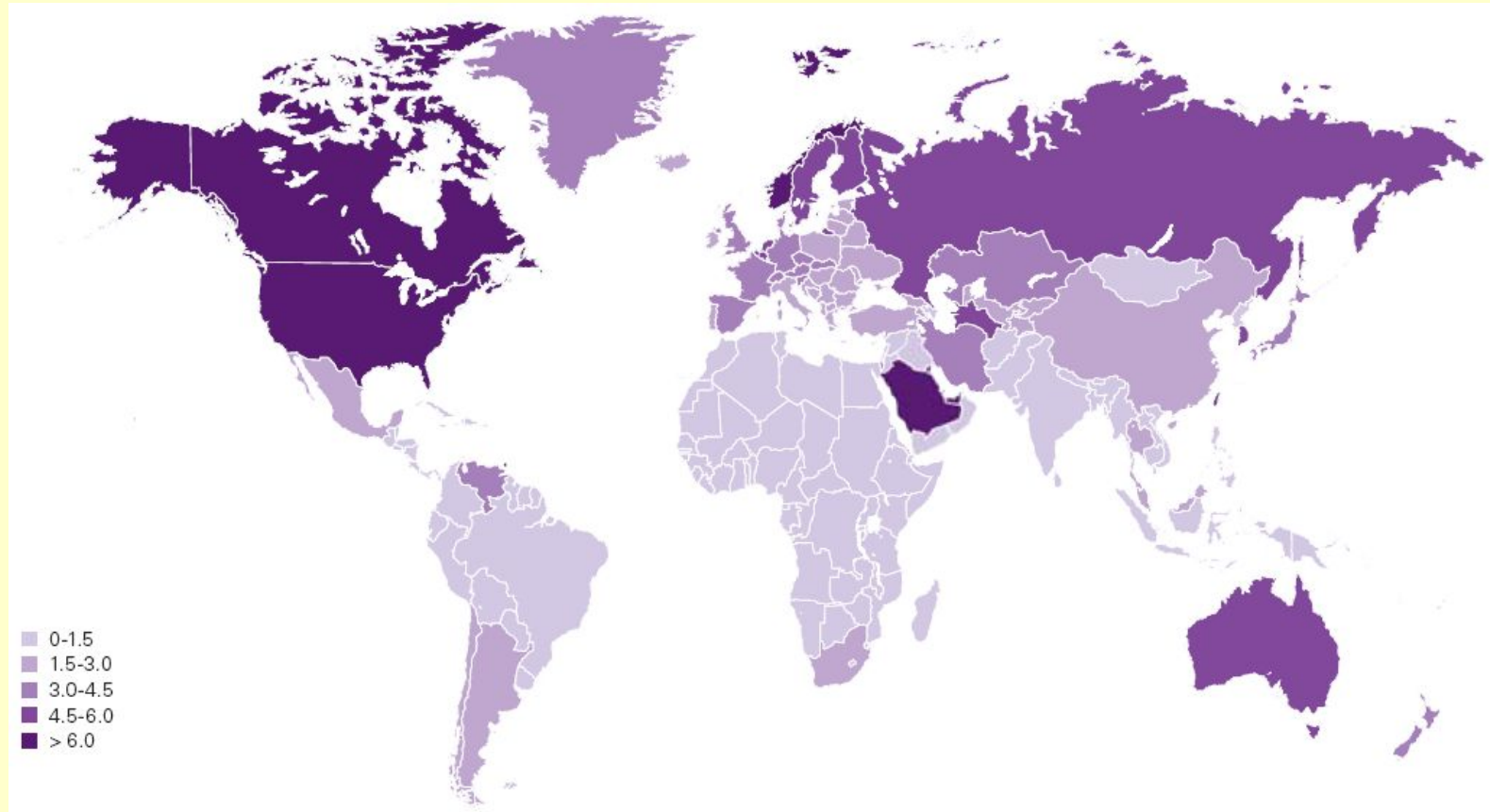
Страны	2010	2011	Изменение в 2011 относительно 2010	↓ Доля в мировом потреблении
США	2277.9	2269.3	-0.4%	18.5%
Западная Европа	1744.8	1690.7	-3.1%	13.8%
Китай	2402.9	2613.2	8.8%	21.3%
Россия	668.7	685.6	2.5%	5.6%
Япония	503.0	477.6	-5.0%	3.9%
Индия	520.5	559.1	7.4%	4.6%
Остальные	3860.0	3979.1	3.1%	32.4%
Мир в целом	11977.8	12274.6	2.5%	100.0%

□ Обстановка стабилизировалась: развитые страны постепенно снижают потребление, но меньшими темпами, чем в кризис, темпы роста Китая и Индии снизились, но Китай окончательно обогнал США по потреблению энергии.

По материалам BP Statistical Review of World Energy 2012, <http://www.bp.com/statisticalreview>

География удельного потребления энергии, 2011 г.

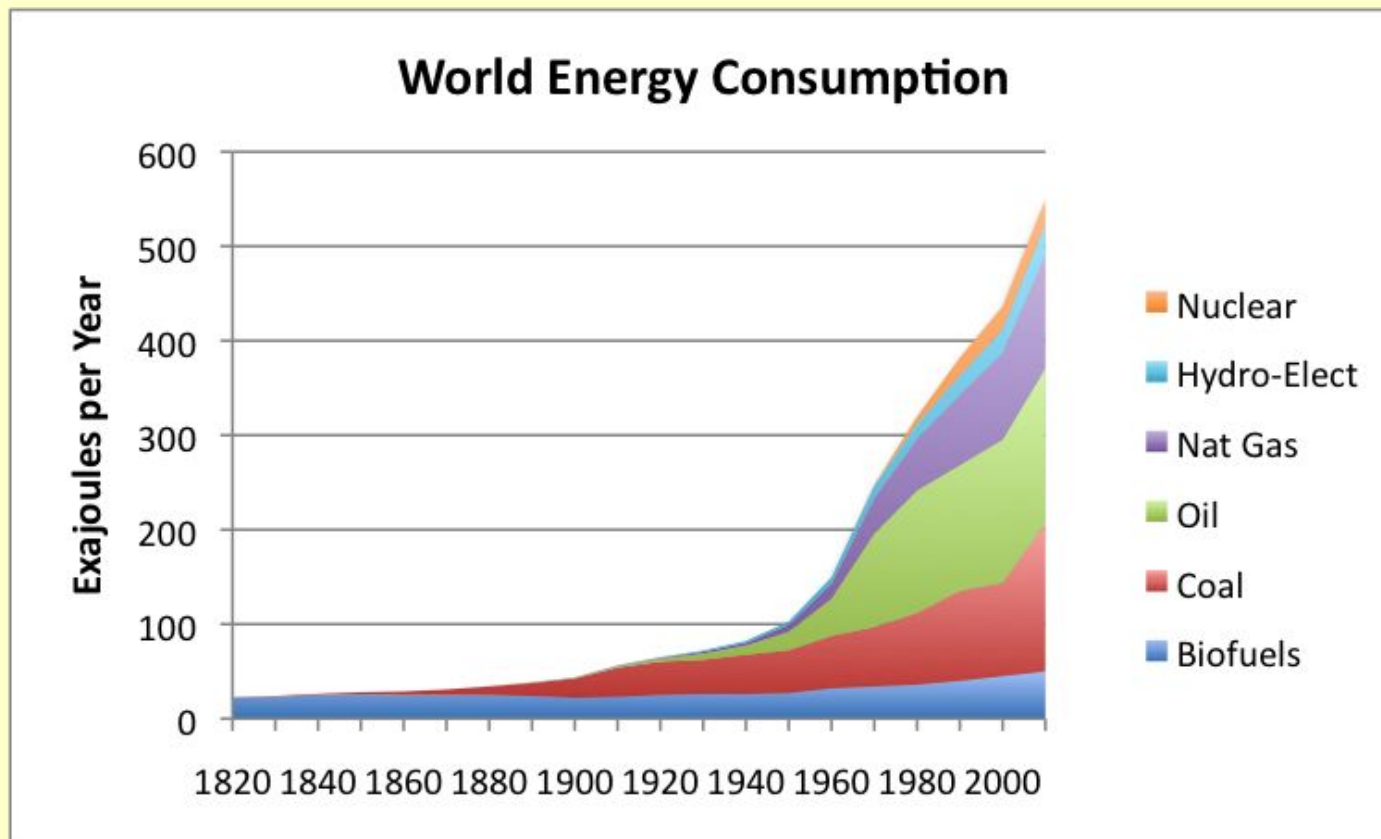
Потребление энергии на душу населения, экв.тонн нефти на душу населения



- Лидируют США, Канада и некоторые страны-поставщики полезных ископаемых – Норвегия, Саудовская Аравия, Россия
- Слаборазвитые страны-поставщики – Нигерия, Ирак, Венесуэла - потребляют мало энергии на душу населения!

BP Statistical Review of World Energy 2012, <http://www.bp.com/statisticalreview>

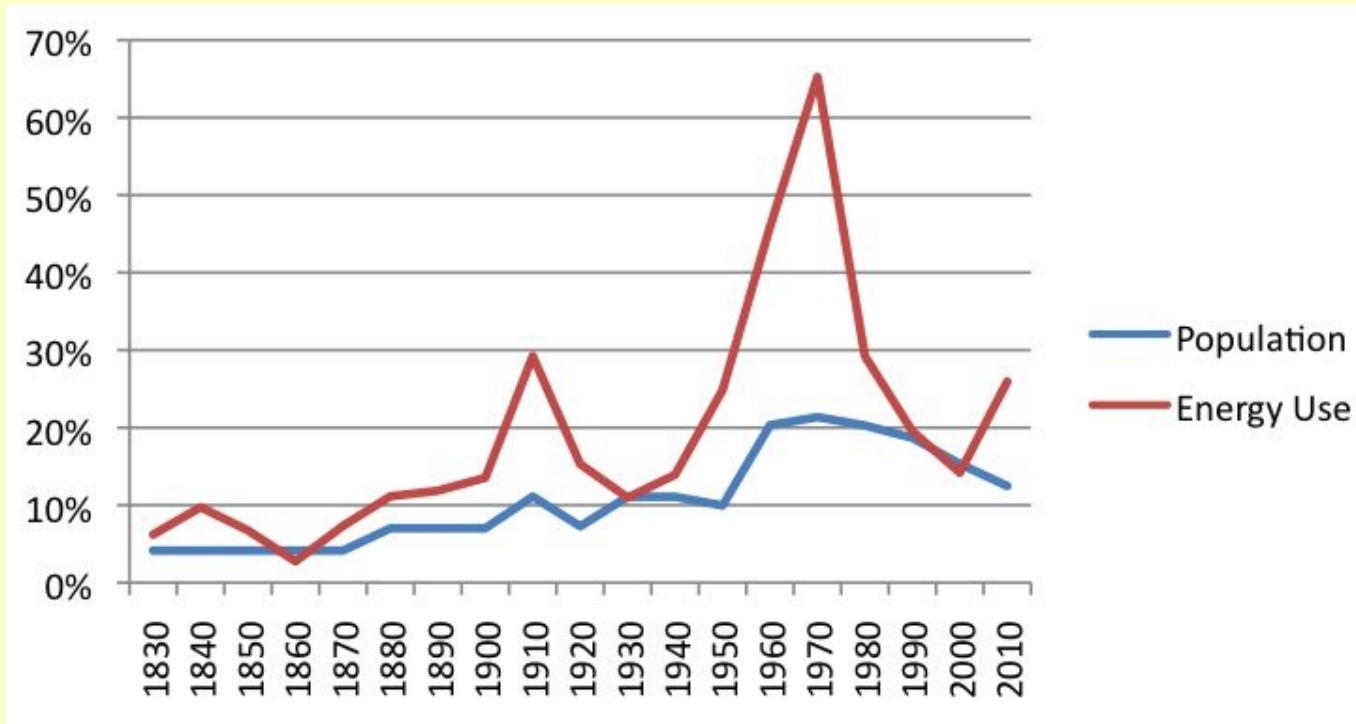
Рост энергопотребления человечества за 200 лет



- Рост энергопотребления происходит последние 200 лет, с начала промышленной революции.
- После Второй Мировой войны процесс значительно ускорился.

<http://www.theoil Drum.com/node/9023>

Темпы роста энергопотребления и населения

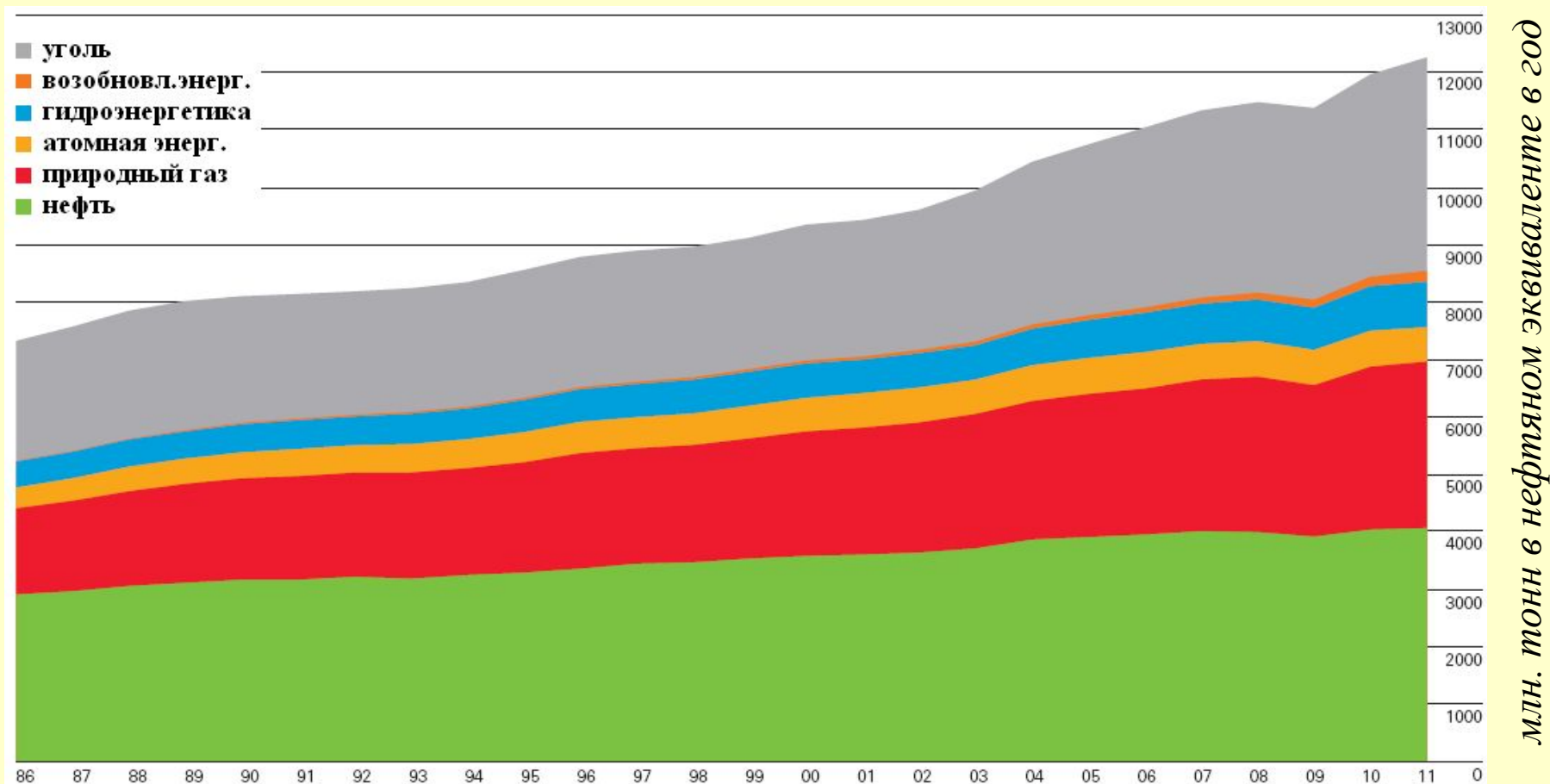


Показан процент нарастания потребления энергии и населения за десятилетие

- Темпы роста неравномерны, несмотря на войны и кризисы, обе величины постоянно растут.
- Перед человечеством стоит три проблемы: энергия, еда, вода.
- Энергия за последние два века вышла на первое место. Это приводило к конфликтам при борьбе за ресурсы – и они будут усиливаться.

<http://www.theoil drum.com/node/9023>

Динамика мирового потребления энергии по видам



- Нефть, газ и уголь – основной источник энергии
- Гидро- и атомная энергетика – по 5 %. Аварии в Чернобыле и Фукусиме сдерживают рост атомной энергетики

BP Statistical Review of World Energy 2012, <http://www.bp.com/statisticalreview>

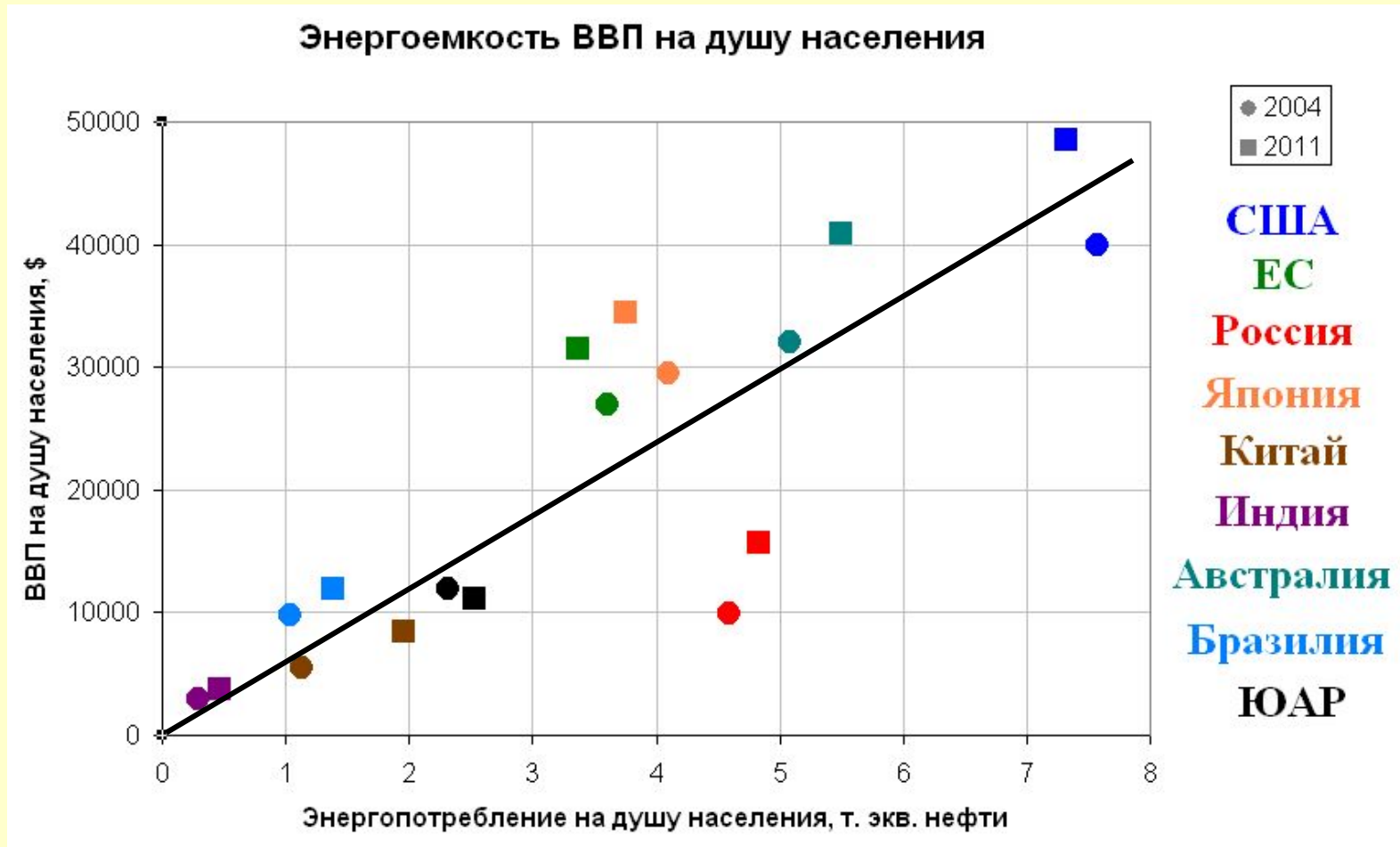
Кто и какую энергию потребляет?

Мировое потребление энергии по видам топлива в %, 2011 год:

Страны	Нефть	Природный газ	Уголь	Атомная энергия	Гидро-энергет.
США	36.7%	27.6%	22.1%	8.3%	3.3%
Западная Европа	38.2%	23.8%	16.9%	12.1%	4.1%
Япония	42.2%	19.9%	24.6%	7.7%	4.0%
Китай	17.7%	4.5%	70.4%	0.7%	6.0%
Индия	29.0%	9.8%	52.9%	1.3%	5.3%
Россия	19.8%	55.7%	13.3%	5.7%	5.4%
Канада	31.2%	28.5%	6.6%	6.5%	25.8%
Бразилия	45.2%	9.0%	5.2%	1.3%	36.4%
Мир в целом	33.1%	23.7%	30.3%	4.9%	6.4%

- Развитые страны США, Западная Европа и Япония имеют близкое распределение по видам топлива
- Китай, Индия потребляют много угля – проблемы экологии
- В России много запасов и потребления природного газа
- В Бразилии и Канаде хорошо поставлена гидроэнергетика

Насколько эффективно используется энергия?



- Наблюдается линейная зависимость между потреблением и ВВП
- США имеют самый большой ВВП и самое большое энергопотребление
- В развитых странах (кроме Австралии) при росте ВВП энергопотребление снижается, в развивающихся – повышается
- Россия неэффективно тратит ресурсы при малом ВВП, выбивается из тренда

Особенности роста

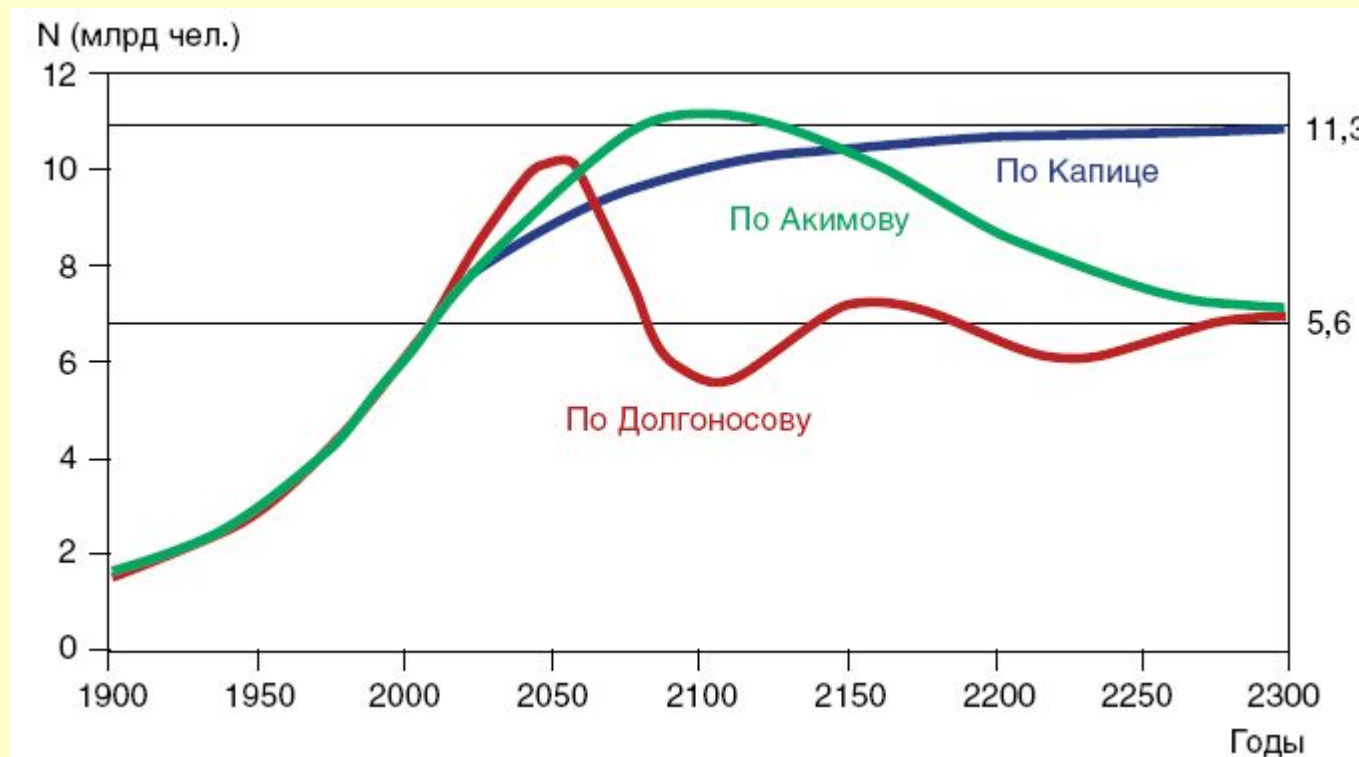
- Причины роста населения и энергопотребления - достижения научно-технического прогресса
 - Рост продолжительности жизни – благодаря питанию. «Зеленая революция» в сельском хозяйстве. Средняя урожайность зерновых поднялась с 6 до 20 ц/га с 1950 к 1980 г.
 - Снижение смертности (особенно детской) - медицина
- Процесс роста энергопотребления взаимосвязан с ростом населения, а также с социально-экономической и политической ситуацией в мире
 - Появление новых источников и повышение эффективности традиционных источников энергии
 - Ключевая проблема – неравномерность производительности труда (технологий) и неравномерность распределения ресурсов на душу населения. Темпы роста населения в Азии (Индия, Китай, Индонезия) значительно превышают темпы роста в странах ОЭСР («золотой миллиард»)
 - Напряженность в мире усиливается с появлением новых информационных технологий и средств коммуникации

Последствия неравномерности

- Возможная устойчивость роста может быть потеряна, так как демографический переход развивающихся стран идет в два раза быстрее, чем в Европе, и охватит в десять раз больше людей. Сравнивая динамику роста народонаселения Европы и Азии, можно увидеть, что Европа навсегда станет малочисленной окраиной, а центр развития в самое ближайшее время переместится в Азиатско-Тихоокеанский регион.
- Неравномерное заселение территорий на границах государств и их экономическое неравенство тоже могут угрожать глобальной безопасности. Просторы Сибири, например, сейчас теряют население, в то время как северные провинции Китая стремительно заселяются. Через границу США и Мексики происходит постоянная миграция на север, и аналогичные процессы могут пойти с 200-миллионным населением Индонезии к северу от обширной Австралии, где живет всего 18 миллионов.
- Стремительно нарастающие неравномерности развития могут стать причиной полной потери устойчивости роста и как следствие привести к вооруженным конфликтам.

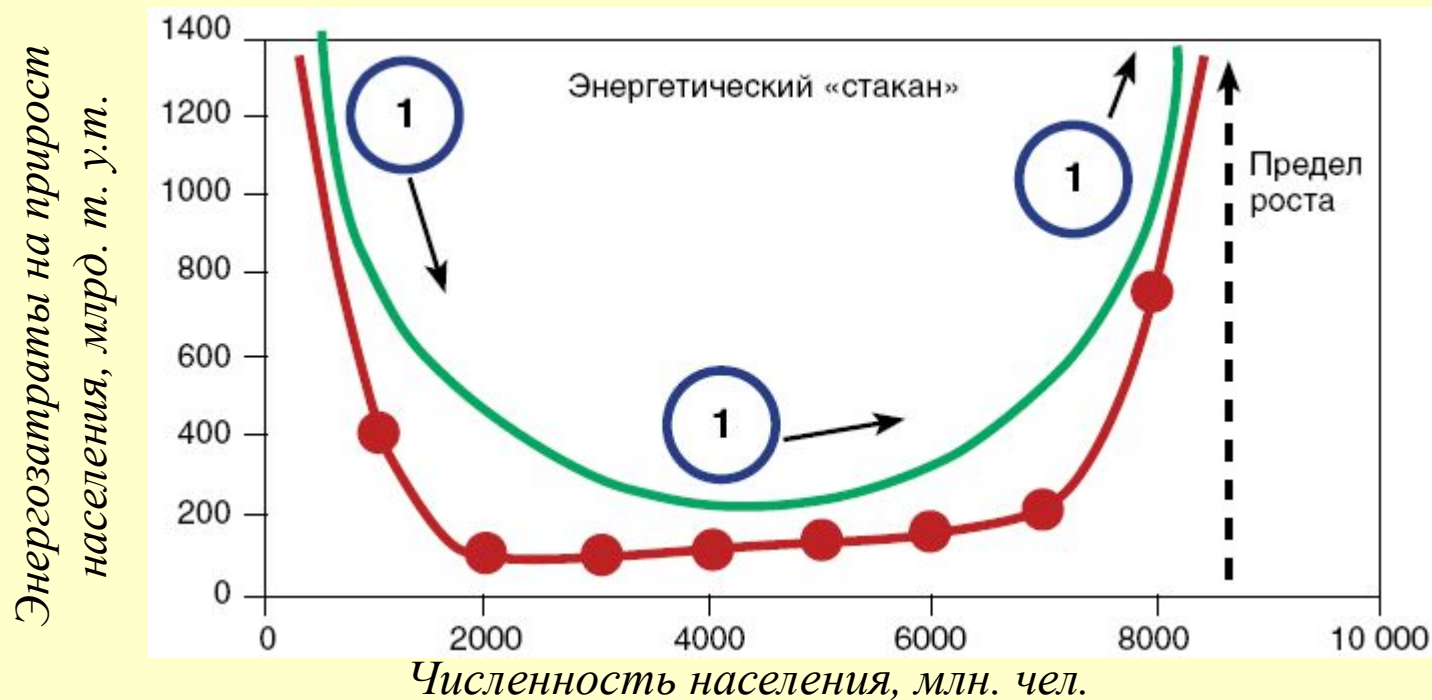
- Виды взаимодействия и их использование в энергетике.
- Возобновляемые (ВИЭ) и невозобновляемые (НИЭ) источники энергии.
- Структура выработки и потребления энергии на примере США.
- Особенности мирового производства и потребления энергии.
- **Результаты прогнозов изменения населения и необходимой энергии в мире.**
- Анализ разведанных запасов источников энергии.
- Энергетические перспективы различных источников энергии.
- Экологические аспекты различных источников энергии.
- Анализ сценариев развития мировой энергетики.

Варианты динамики численности населения



- Представлено три варианта динамики численности населения Земли.
- Разброс в оценках для XXI века составляет до 200%!
- Основная неопределенность - в XXI веке мировая экономика будет расти, стабилизироваться или падать? Это зависит от сценария энергопотребления в условиях истощения энергоресурсов.

Оценка оптимальной численности населения



- Для выхода на уровень населения Земли на первый 1 млрд. было затрачено энергии в 4 раза больше, чем на два последующих. Новые миллиарды стоят все дороже. Сейчас на прирост в 1 млрд. надо затратить в 2 раза больше, чем на первый, дальше – больше.
- Аппроксимируется «потенциальной ямой». Хватит ли энергии преодолеть барьер, или население уменьшится до экономически выгодной численности?

«Экономические стратегии», №12/2011, стр.8-9

Простейшие оценки энергопотребления

$$Q=10^{21} \text{ Дж.} \quad 1 \text{ кВт час}=3.6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

- На Землю ежегодно падает от Солнца $S \cong 3300 Q$.
(примерно половина отражается)
- Сейчас человечество потребляет **0.5 Q**:
 $7 \text{ млрд} \times 2.2 \text{ кВт} \times 3600 \text{ с} \times 24 \times 365 = 0.486 \cdot 10^{21} \text{ Дж}$
Прогноз на 2020 - 0,6 Q.
- Чтобы подтянуть энерговооруженность отстающих стран до уровня выше 2 –3 кВт/чел, нужно поднять среднюю по Земле до ~6 кВт/чел. (в 2 раза меньше, чем сейчас в США)
- При 10 млрд. населения это даст годовую потребность в 1,89 Q

Пределом годового потребления с точки зрения катастрофических изменений климата считается 0,1% от S ,т.е. 3,3 Q (путь к мезозою и динозаврам)

Рост мирового энергопотребления

Три сценария развития

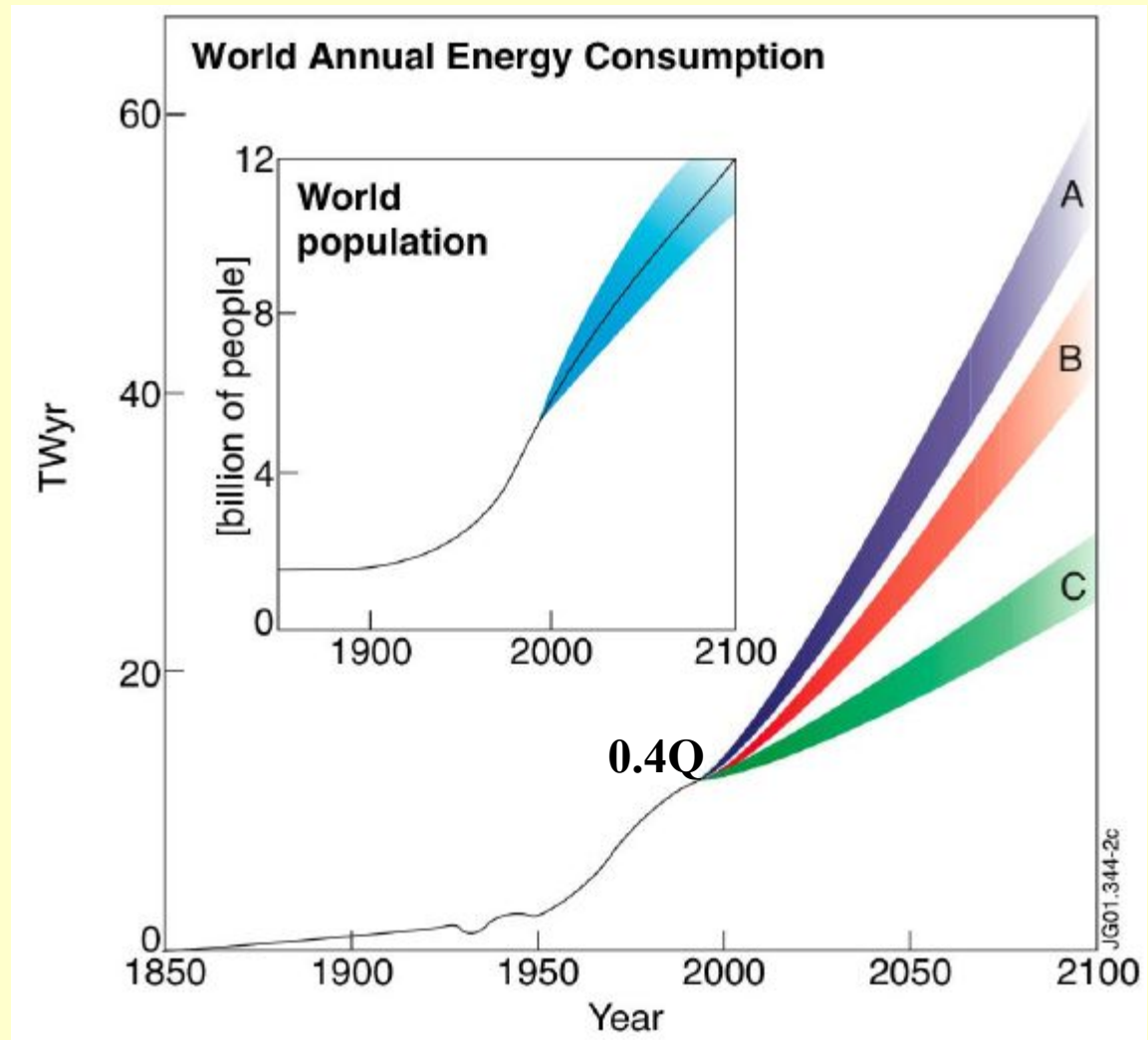
А – самые смелые прогнозы развития технологий

В – реалистическая оценка с умеренным экономическим ростом

С – «зеленый» сценарий с жестким контролем за воздействием на окружающую среду.

На вставке – прогноз роста населения Земли

Уширение линий иллюстрирует возможный разброс внутри прогноза



N.Nakicenovic et al., "Global Energy Perspectives", IIASA and World Energy Council, Cambridge University, 1998

- Виды взаимодействия и их использование в энергетике.
- Возобновляемые (ВИЭ) и невозобновляемые (НВИЭ) источники энергии.
- Структура выработки и потребления энергии на примере США.
- Особенности мирового производства и потребления энергии.
- Результаты прогнозов изменения населения и необходимой энергии в мире.
- Анализ разведанных запасов источников энергии.
- Энергетические перспективы различных источников энергии.
- Экологические аспекты различных источников энергии.
- Анализ сценариев развития мировой энергетики.

Приблизительная оценка энергоресурсов

Топливо	Разведанные запасы (2009)	Лет использования при современных темпах потребления	Лет использования при прогнозируемых* темпах потребления
Уголь	0.9×10^{12} т.	210	70 лет
Нефть	1.3×10^{12} бар.	35	12 лет
Газ	1.9×10^{14} м ³	65	22 года
Уран (руда)	4.7×10^6 т.	270 (8000**)	90 лет (2700 лет**)
Уран (морск.вода)	4.5×10^9 т.	250000	83000
Дейтерий	4.6×10^{13} т.	100 млрд	33 млрд

* – при широком использовании реакторов-размножителей.

** – при сценарии с умеренным экономическим ростом к 2100 году

□ Если проблемы с развитием ядерной энергетики (деления, синтеза и их комбинации) и ВИЭ не будут в ближайшей исторической перспективе решены, то человечество столкнется с серьезными проблемами уже в ближайшем столетии

- Виды взаимодействия и их использование в энергетике.
- Возобновляемые (ВИЭ) и невозобновляемые (НИЭ) источники энергии.
- Структура выработки и потребления энергии на примере США.
- Особенности мирового производства и потребления энергии.
- Результаты прогнозов изменения населения и необходимой энергии в мире.
- Анализ разведанных запасов источников энергии.
- Энергетические перспективы различных источников энергии.
- Экологические аспекты различных источников энергии.
- Анализ сценариев развития мировой энергетики.

Текущие источники первичной энергии

PRIMARY ENERGY SOURCE	CONTRIBUTION TO PRIMARY ENERGY PRODUCTION (2008)
Oil	33.7 %
Coal	23.8 %
Gas	29.6 %
Fission	5.2 %
Hydro-electricity	6.4 %
Solar, wind, wood, waste,..	1.3 %

Table III Contribution of different primary energy sources to the primary energy production in the world [8].

[8] “Statistical Review of World Energy 2009”, www.bp.com

Эффективность ВИЭ

Категория	Источник	Выход, Вт/м ²	Доступно Q в год
Солнце	Солнечный нагрев и фотоэлектрическое преобразование	5-50	0.6 – 6
	Ветер	2-3	2
	Волны	30	0.06
Гравитация	Приливы	3-6	0.1
	Гидроэлектростанции	11	0.75
Сельское хозяйство	Биогаз, этанол, древесина	0.02-1.2	1.3
Земля	Геотермальная энергия	0.017	0.1

- Возобновляемые источники энергии являются в основном распределенными с очень низкой плотностью энергии.
- При этом ТЭС или АЭС мощностью 1 ГВт имеют выход ~ 150 кВт/м².

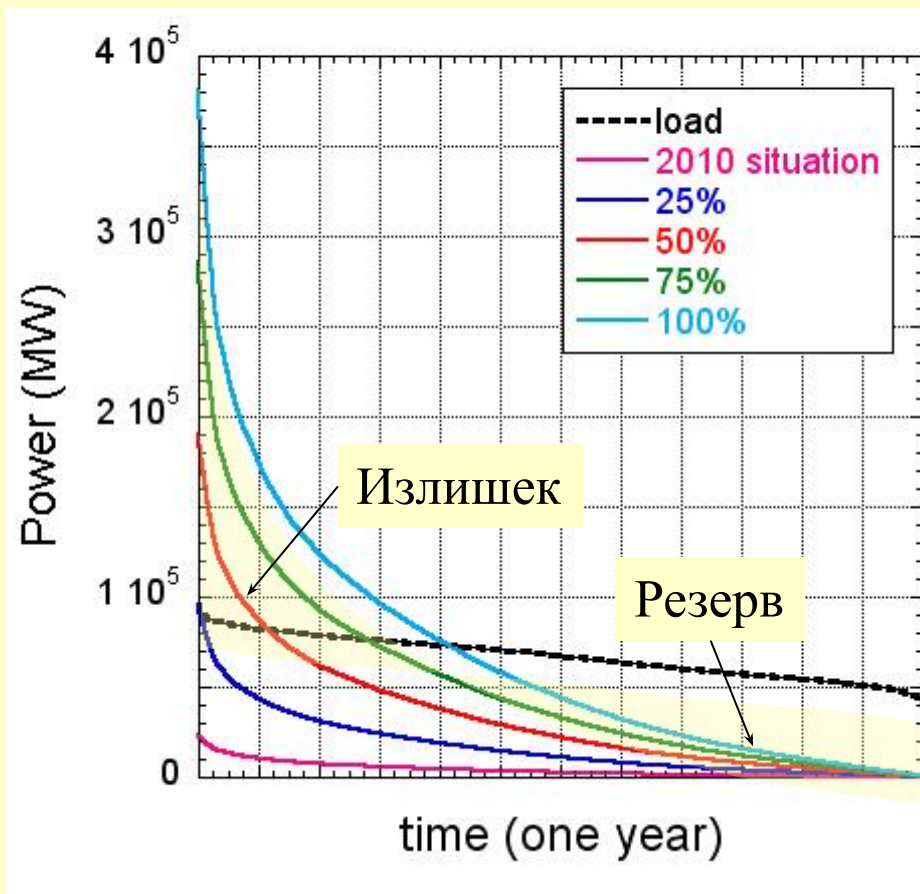
J.Ongena, G.Van Oost, Transactions of Fusion Science and Technology, Vol.61, Feb. 2012

http://worldoceanobservatory.org/events/oceanenergy/images/tidal_energy.pdf

<http://www.carnegiewave.com/index.php?url=/ceto/global-wave-energy>

<http://tung-sten.no-ip.com/Texts/Popsci/Energy/Oil.htm>

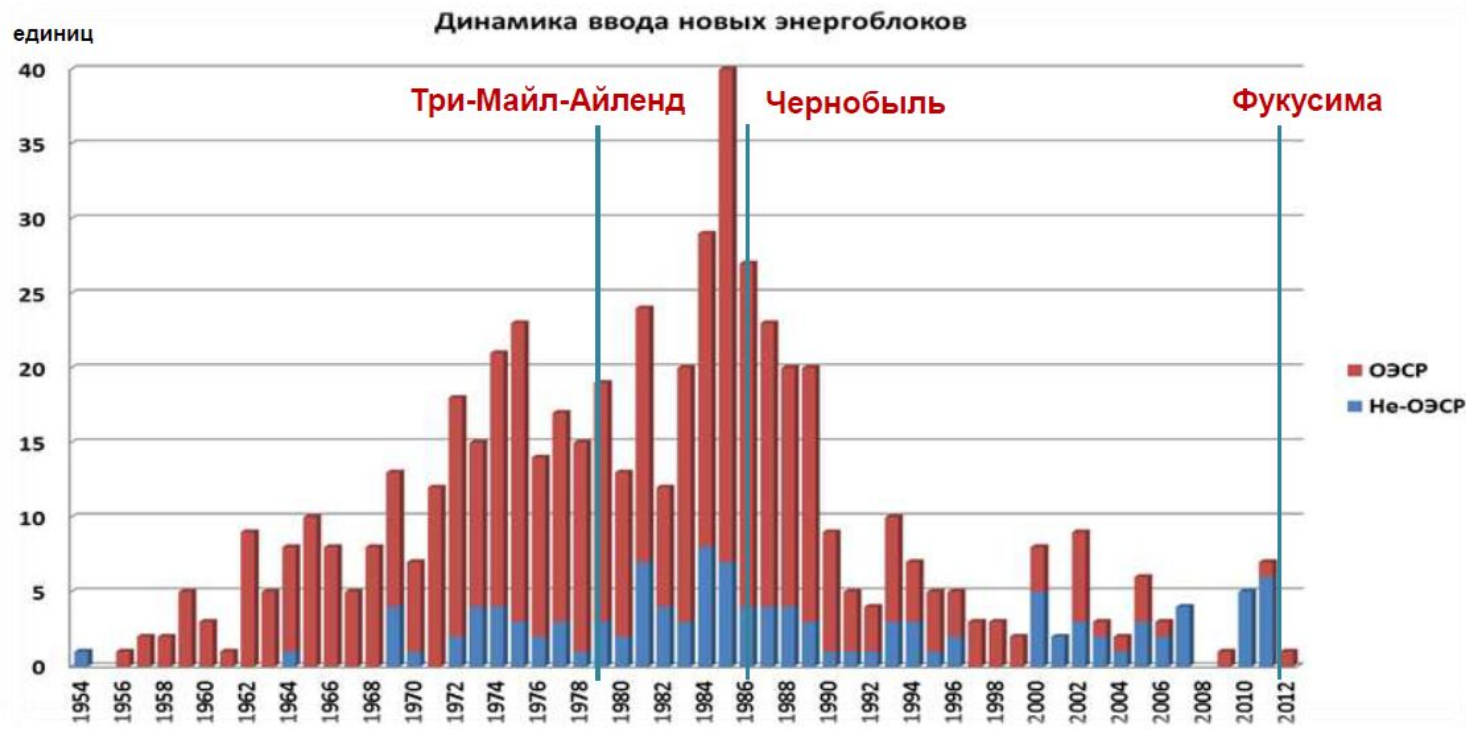
Временная неравномерность ВИЭ



- Необходима разработка эффективных методов аккумуляции энергии (например, закачивание воды и воздуха в резервуары на пике и стравливание при необходимости).
- За счет этого системы становятся дороже, но при росте цен на энергоносители может иметь хорошие перспективы.

Динамика ввода энергоблоков АЭС

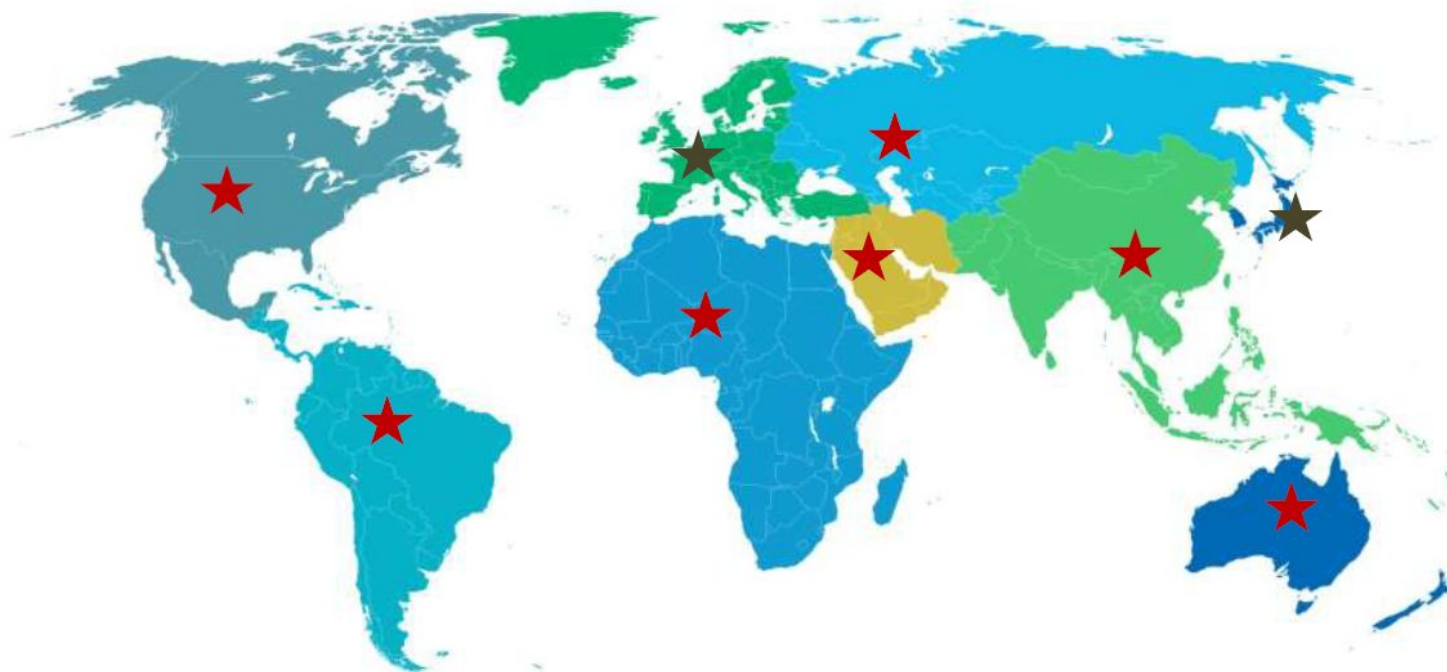
Исторически крупные аварии на АЭС приводили к мораториям и остановке принятия решений по строительству новых энергоблоков



Ситуация в атомной энергетике во многом будет определяться вероятностью повторения катастрофических событий в будущем

Пересмотр политики ввода АЭС после 2011 г.

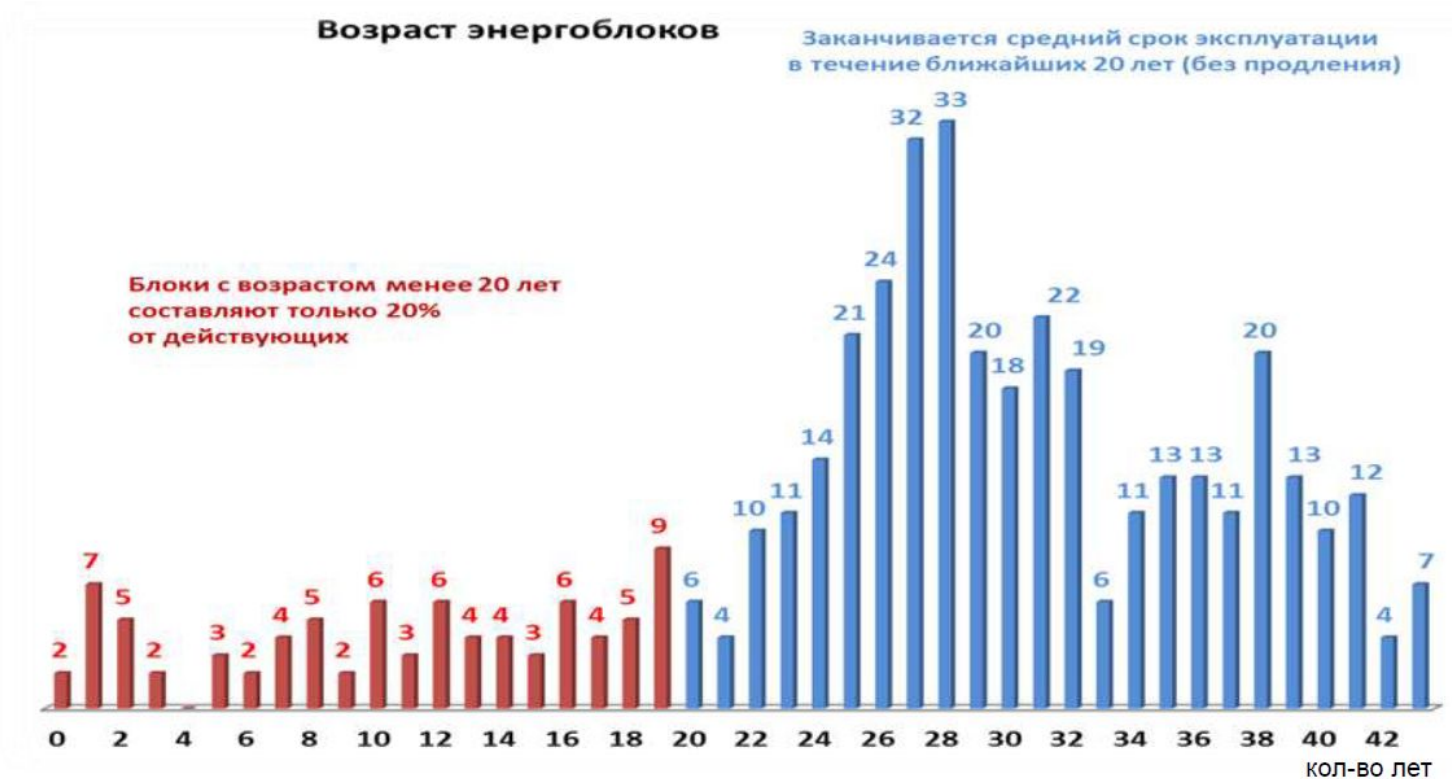
После Фукусимы о кардинальном пересмотре политики в области АЭС задумались только Япония и некоторые европейские страны



- ★ - Регионы, в которых есть страны заявившие о пересмотре политики в отношении АЭС
- ★ - Регионы, страны которых намерены продолжать развивать атомную энергетику

Необходимость модернизация АЭС

Атомная энергетика в рассматриваемом периоде потребует значительной модернизации



Перспективы ядерных технологий

- Запасы U235 ограничены (0.7% в добываемом уране – остальное U238).
- Доработка и распространение реактора на тяжелой воде (CANDU) работающим с необогащённым топливом.
- Доработка и распространение реакторов на быстрых нейтронах и реакторов-размножители на U238 и Th232 ($k_B > 1$). Проблемы теплоносителя. Проблема экономическая (1 BREEDER = 20 CANDU).
- Разработка гибридных схем с внешними высокоэнергетическими нейтронами. Например, могут быть использованы термоядерные (14.1 МэВ) нейтроны.
- Разработка термоядерных технологий для генерации нейтронов (гибриды) и энергии.

- Виды взаимодействия и их использование в энергетике.
- Возобновляемые (ВИЭ) и невозобновляемые (НИЭ) источники энергии.
- Структура выработки и потребления энергии на примере США.
- Особенности мирового производства и потребления энергии.
- Результаты прогнозов изменения населения и необходимой энергии в мире.
- Анализ разведанных запасов источников энергии.
- Энергетические перспективы различных источников энергии.
- Экологические аспекты различных источников энергии.
- Анализ сценариев развития мировой энергетики.

Основные экологические последствия энергетики

- Выделение тепла (тепловые машины с КПД 30-40 %) – тепловой баланс поверхностных и приповерхностных слоев, водоемов (водохранилища в гидроэнергетики). Изменение локального климата (биоравновесия – популяций-флоры и фауны-...).
- Выделение тепла в виде водяного пара (градирни) – основной источник парниковых газов. Выделение (в зависимости от источника) других парниковых газов (углекислый газ, метан и др.) – парниковый эффект. Изменение глобального климата.
- Загрязнение среды (в зависимости от источника) – химическое и радиоактивное заражение почвы, воды, воздуха. Переработка отходов! (Из-за протестов местного населения было закрыто несколько заводов по производству солнечных панелей вблизи Шанхая в 2011).
- Звуковые и электромагнитные воздействия на биосферу, в первую очередь, на человека (в зависимости от источника энергии, пример - ветряки).
- ВНР (Biological Hazard Potential), оценка вреда радиоактивных веществ для человеческого организма (по данным МАГАТЭ) для АЭС соизмерим с угольной ТЭС, для термоядерных станций он ожидается ниже в 1000 раз.

Парниковый эффект

- Парниковый эффект – повышение температуры нижних слоёв атмосферы по сравнению с температурой теплового излучения планеты, наблюдаемого из космоса.
- Парниковый эффект обусловлен их различной прозрачностью в видимом и дальнем инфракрасном диапазонах верхних слоев атмосферы (тропосферы). На диапазон длин волн 400—1500 нм (видимый свет и ближний инфракрасный диапазон) приходится 75 % энергии солнечного излучения, большинство газов не поглощают в этом диапазоне. Солнечный свет поглощается поверхностью планеты и её атмосферой (особенно излучение в ближней УФ- и ИК-областях) и разогревает их. Нагретая поверхность планеты и атмосфера излучают в дальнем инфракрасном диапазоне.
- Тропосфера, содержащая газы, поглощающие в этой области спектра (т. н. парниковые газы — водяной пар, CO_2 , CH_4 и пр.) существенно непрозрачна для такого излучения, направленного от её поверхности в космическое пространство. В результате эффективная температура ближних слоев атмосферы и поверхности Земли может увеличиваться (до 20%).

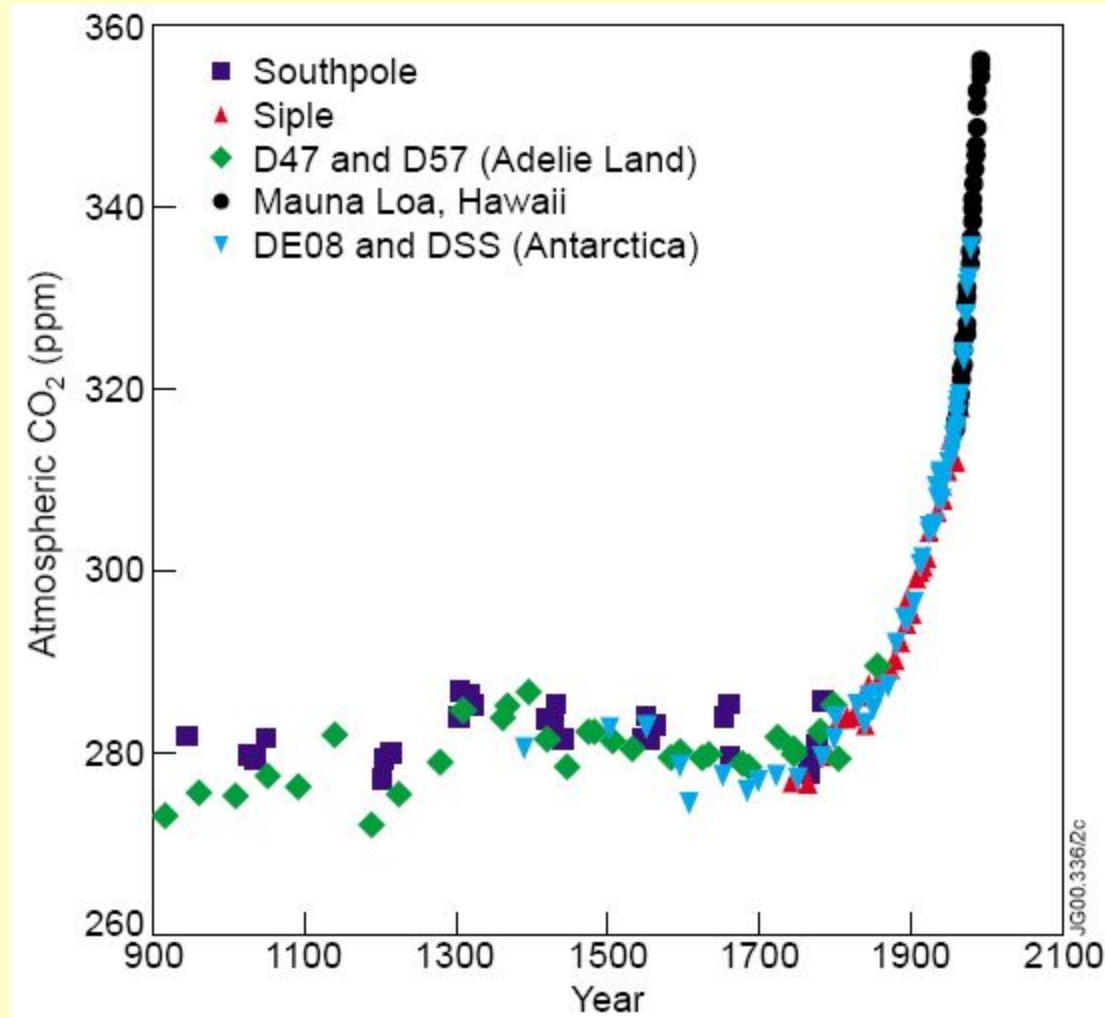
Антропогенный парниковый эффект

- Исходя из того, что «естественный» парниковый эффект - это устоявшийся, сбалансированный процесс, увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере должно привести к глобальному потеплению климата.
- Исследования показывают, что на протяжении последних 160000 лет содержание CO_2 в земной атмосфере было примерно постоянным на уровне 280 частиц на миллион.
- При сжигании ископаемого топлива происходит мощная эмиссия углекислого газа, так как углерод входит в состав не только каменного угля, но и нефти и природного газа. Для справки: для получения 1 ГВт электроэнергии надо сжечь 2.7 млн тонн угля (поезд длиной более 500 км). При этом выделится 10 млн тонн CO_2 .
- В результате, начиная с 1700-х годов, наблюдается экспоненциальный рост содержания CO_2 .
- Нет гарантии, что при снижении выбросов экосистема вернется к исходному состоянию!

IPCC Fourth Assessment Report. R.K.Pachauri et al., Cambridge IPCC, Geneva, Switzerland (2007).

http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm

Изменение содержания углекислого газа

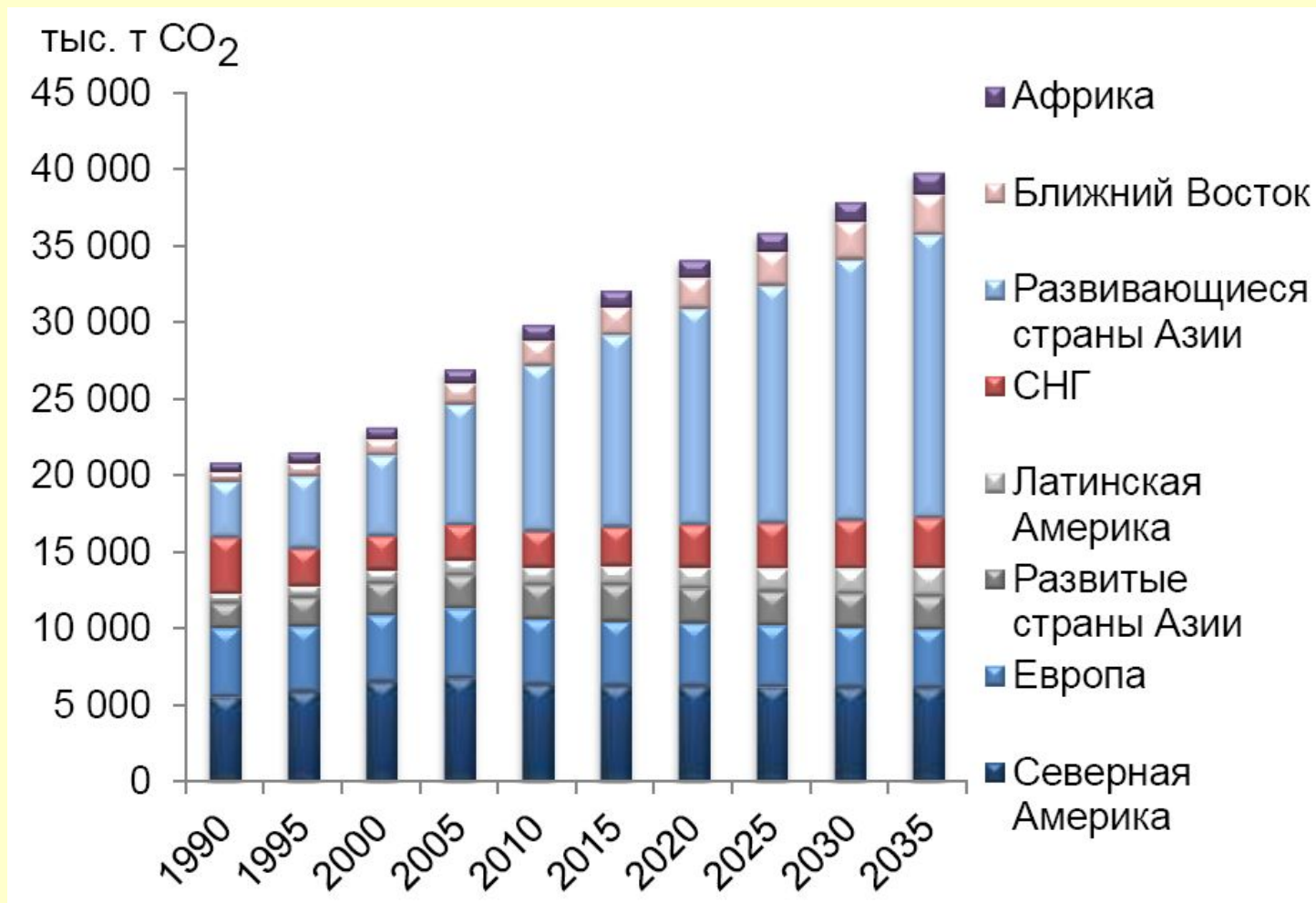


Содержание CO₂ в атмосфере по разным источникам за 1000 лет.

Необходимо учитывать и другие парниковые газы, добавка эквивалентна 15%

F.Joos, "The Atmospheric Carbon Dioxide Perturbation", Europhysics News, 27, 6, 213-218 (1996).

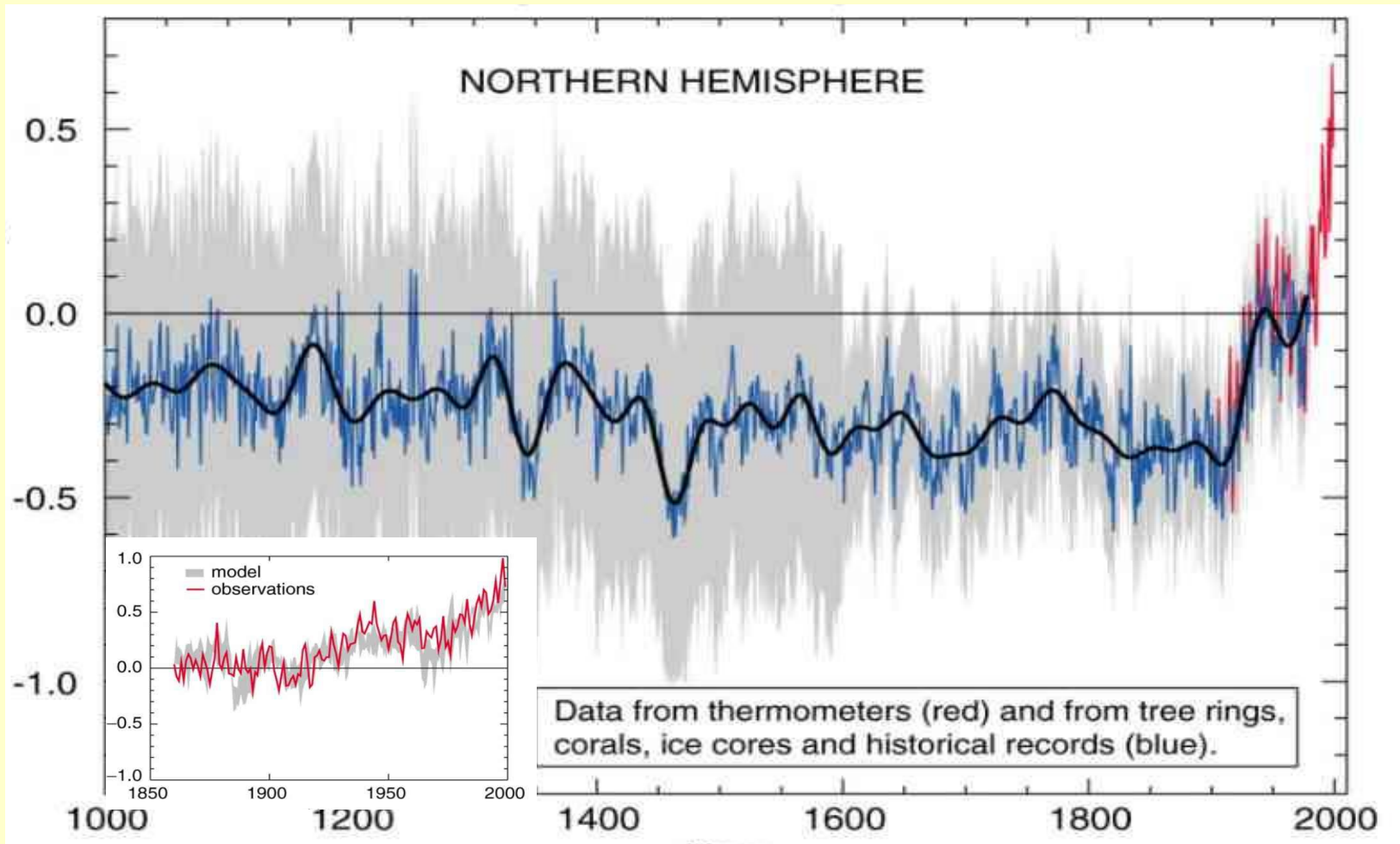
Выбросы углекислого газа по регионам



- Почти весь прирост выбросов приходится на развивающиеся страны.
- Развитые страны снижают выбросы, но общую ситуацию это не меняет.

Прогноз развития энергетики мира и России до 2035 г., ИНЭИ РАН, РЭА, 2012

Изменение приповерхностных температур



- Изменение температуры земной поверхности за тысячелетие. Данные по Северному полушарию. Красным цветом представлены прямые измерения термометрами, серым – по годичным кольцам деревьев, синим – по ледовым пробам и историческим записям.

Киотский протокол

- Киотский протокол — международный документ, принятый в Киото в декабре 1997 года в дополнение к Рамочной конвенции ООН об изменении климата.
- По состоянию на 2012 год Протокол был ратифицирован 190 страной мира (совокупно ответственными за ~62 % общемировых выбросов). Исключения — США, Канада.
- В соответствии с ним, к 2012 году планируется снизить выброс шести типов газов, вызывающих парниковый эффект, на 5,2 процента по сравнению с уровнем 1990 года.
- Киотский протокол стал первым глобальным соглашением об охране окружающей среды, основанным на рыночных механизмах регулирования — механизме международной торговли квотами на выбросы парниковых газов.
- Канада вместо снижения на 6% повысила выбросы на 17% и в 2011 году под угрозой огромных штрафов решила выйти из соглашения.
- В целом ужесточение контроля на руку индустриальным странам, так как это будет сдерживать экономическое развитие развивающихся стран.

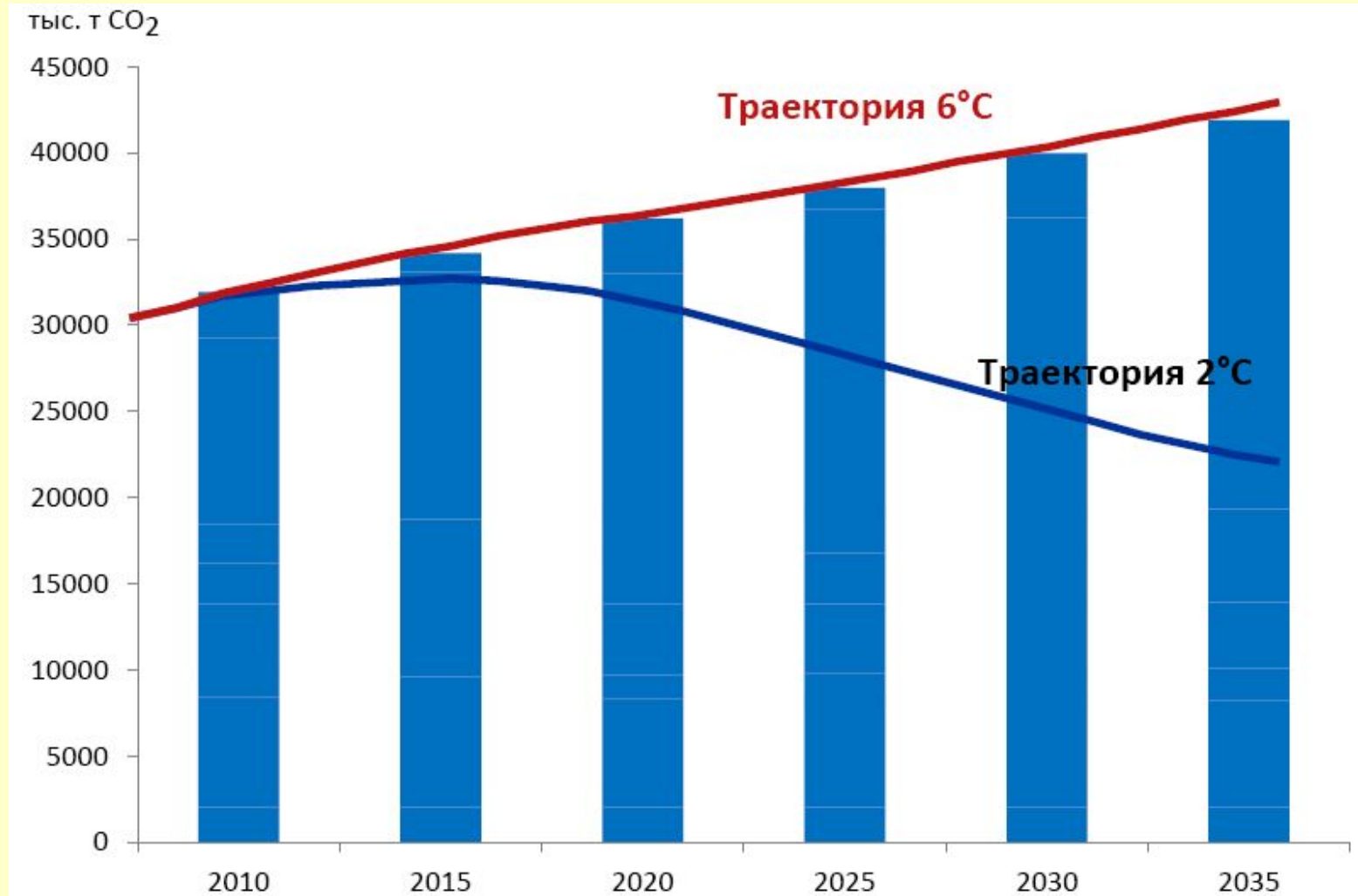
Сценарии роста температуры

- На начальной стадии глобального потепления в Канаде, России и Скандинавии изменения климата могут приводить к положительному эффекту. Улучшаются условия сельскохозяйственного производства, меньше топлива расходуется на обогрев.
- Однако положительный эффект возможен только до уровня глобального потепления в $2-3^{\circ}\text{C}$ (что в северных широтах означает примерно $4-6^{\circ}\text{C}$), далее эффект от изменений климата сугубо негативный. Вредители, наводнения и засухи приводят к снижению урожайности, растет число ураганов и ливневых осадков, все больше энергии тратится на охлаждение, появляются «южные» болезни и т. п.
- Отсчет потерь начинается с относительно безопасного уровня глобального потепления, равного $2-3^{\circ}\text{C}$, когда потери от изменений климата равны $0-3\%$ мирового ВВП.

Nicholas Stern. The Economics of Climate Change. UK, 2006.

http://www.climatechange.ru/files/Stern_Summary_RUS.pdf

Сценарии роста температуры



Выход на траекторию 2°C уже неосуществим, наиболее реалистична 6°C

Прогноз развития энергетики мира и России до 2035 г., ИНЭИ РАН, РЭА, 2012

Экологические проблемы АЭС преувеличены

Проблемы АЭС во многом преувеличены пропагандой.

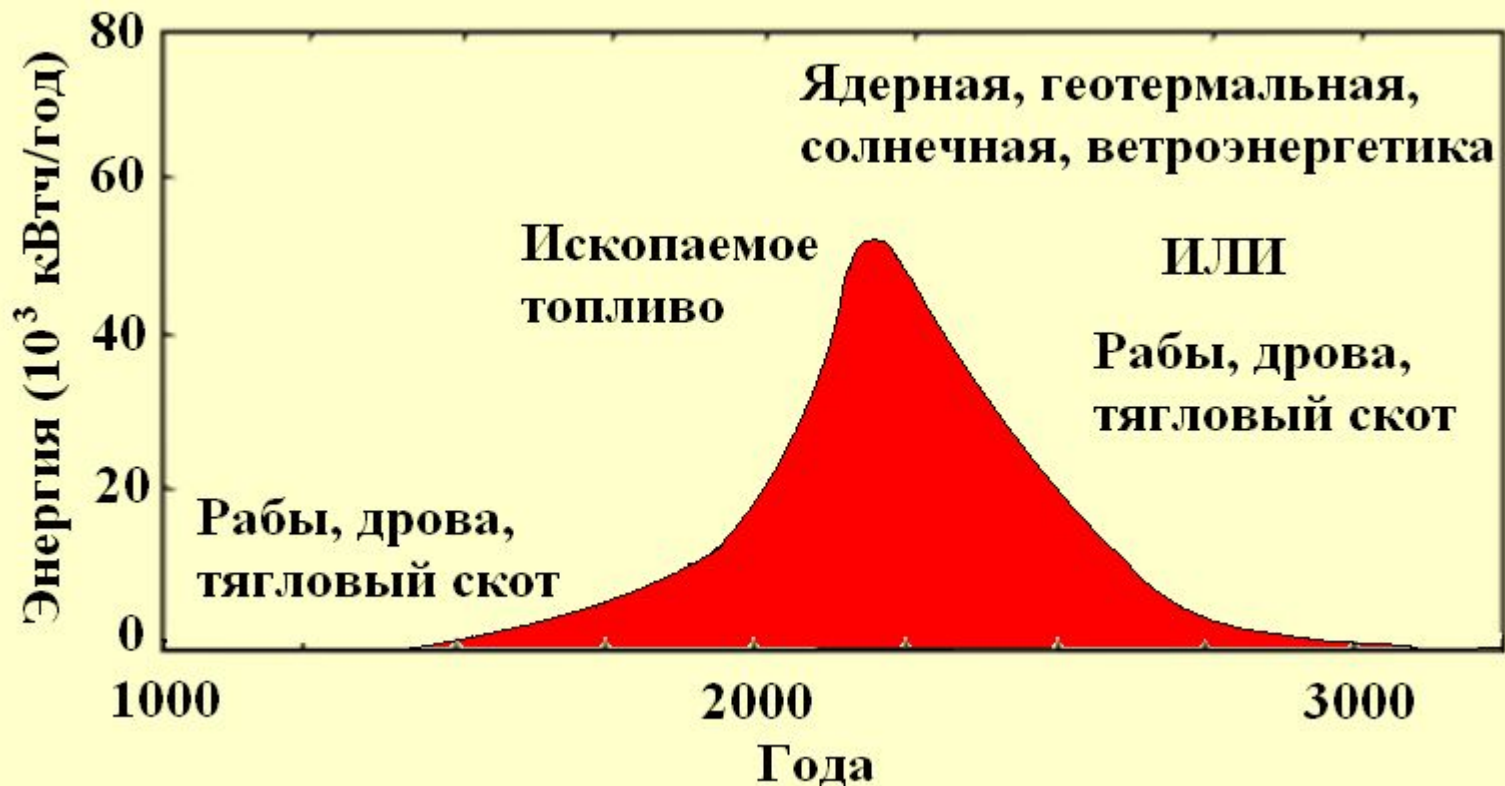
- Для получения 1 ГВт электричества в год требуется 28 тонн топлива (с учетом реакций на U и Pu). В результате получаем 28 тонн сильно радиоактивной среды. Но при ее переработке можно извлечь 224 кг ^{235}U , 26400 кг ^{238}U , 170 кг изотопов Pu. В результате получается только 1 т (50 л) требующих захоронения радиоактивных отходов. Процесс переработки весьма сложен и производится только в отдельных государствах. Но в любом случае влияние АЭС сопоставимо по вредности с выбросами парниковых газов ТЭС.
- Необходимо иметь в виду, что в угле, сжигаемом на ТЭС, содержатся следовые количества U (1 ppm) и Th (2 ppm). При этом 1% золы выбрасывается в атмосферу. Исходя из этого, угольная ТЭС, производящая 1 ГВт электричества, опаснее для населения, чем штатно работающая АЭС с водным реактором такой же мощности.

Scientific American, December 2007

<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=coal-ash-is-more-radioactive-than-nuclear-waste&page=2>

- Виды взаимодействия и их использование в энергетике.
- Возобновляемые (ВИЭ) и невозобновляемые (НИЭ) источники энергии.
- Структура выработки и потребления энергии на примере США.
- Особенности мирового производства и потребления энергии.
- Результаты прогнозов изменения населения и необходимой энергии в мире.
- Анализ разведанных запасов источников энергии.
- Энергетические перспективы различных источников энергии.
- Экологические аспекты различных источников энергии.
- **Анализ сценариев развития мировой энергетики.**

Энергетические и социальные альтернативы



Футурологические размышления

- Запасы минерального топлива будут снижаться (нефть, газ) в ближайшие несколько десятков лет. Лучше их сохранять для химической промышленности (производства на основе углеводородов). Разработка нетрадиционных газа и нефти могут ослабить напряженность.
- Прогноз по углю – хватит лет на сто. Необходима разработка технологии перехода на искусственное топливо (из угля) и на водородное топливо.
- Парниковый эффект может заставить быстрее отказаться от углеводородов.
- ВИЭ должны развиваться, но в ближайшей исторической перспективе неясно, смогут ли они заменить углеводороды при росте как населения, так и его энерговооруженности.
- Основная надежда на ядерные технологии. Реакторы деления – CANDU, быстрые. Только разработка бридеров позволит воспроизводить топливо и иметь энергетические перспективы на тысячи лет. Весьма перспективны гибридные схемы, существенно увеличивающие скорость наработки топлива.
- Ядерные синтез даст практически неисчерпаемый источник энергии.

Дополнительные материалы

Соотношения расхода и потребления

Чтобы вскипятить литр воды, надо затратить энергию падения тонны воды с плотины высотой 50 метров (КПД ГЭС 90%) => Мы тратим много энергии, получать которую весьма трудозатратно.

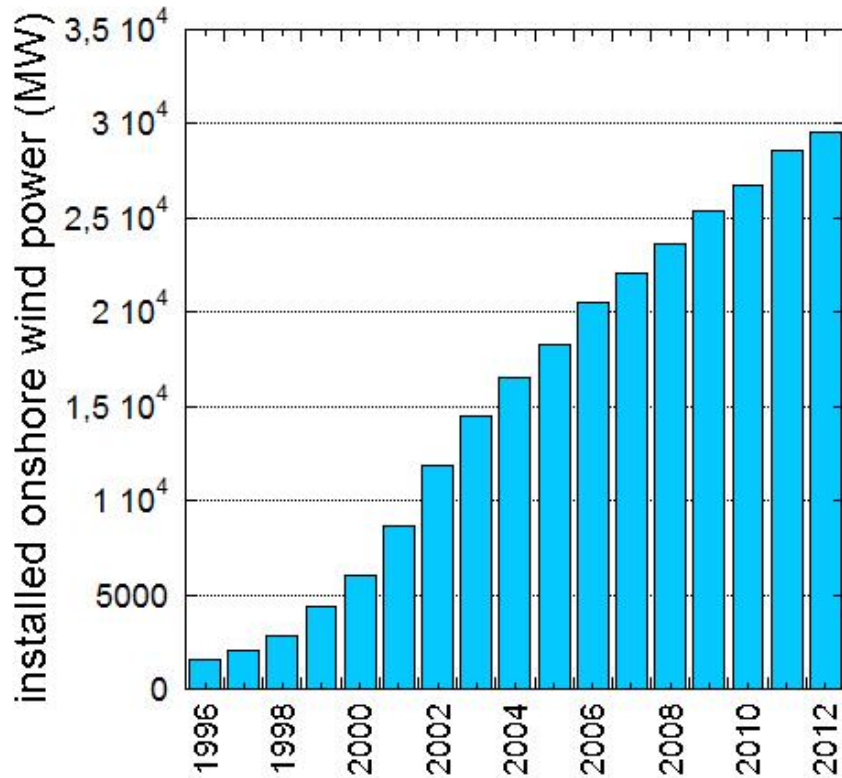
Расход на транспорт	Выработка энергии
Авиация – 30 кВтч	Волны – 4 кВтч
Автомобиль – 40 кВтч	Солнце – 13 кВтч
	Ветер – 20 кВтч

Средний британец проезжает в день 50 км на автомобиле и совершает 1 раз в год дальний авиаперелет. Усредненно затраты на транспорт 70 кВтч за день.

Если покрыть 10% территории Британии ветряками, на каждой крыше сделать солнечные панели, и построить 500-км волновую ЭС в Атлантике – дневная выработка на человека составит 37 кВтч – не покрое даже автотранспорт!

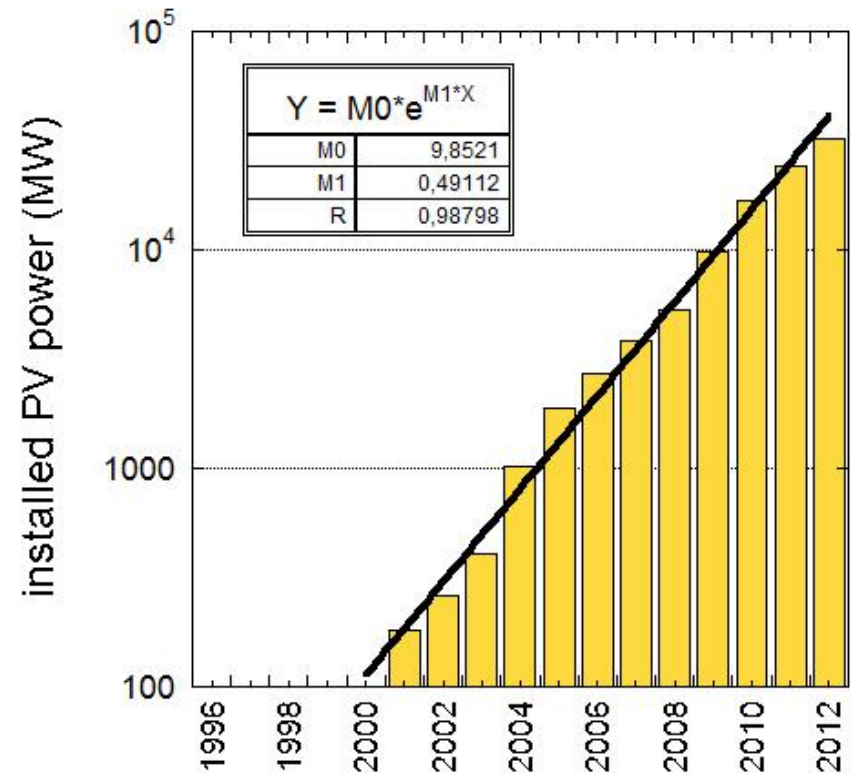
Рост использования возобновляемых источников энергии в Германии

Сухопутные ветроэлектростанции



Линейный рост, выходит на насыщение

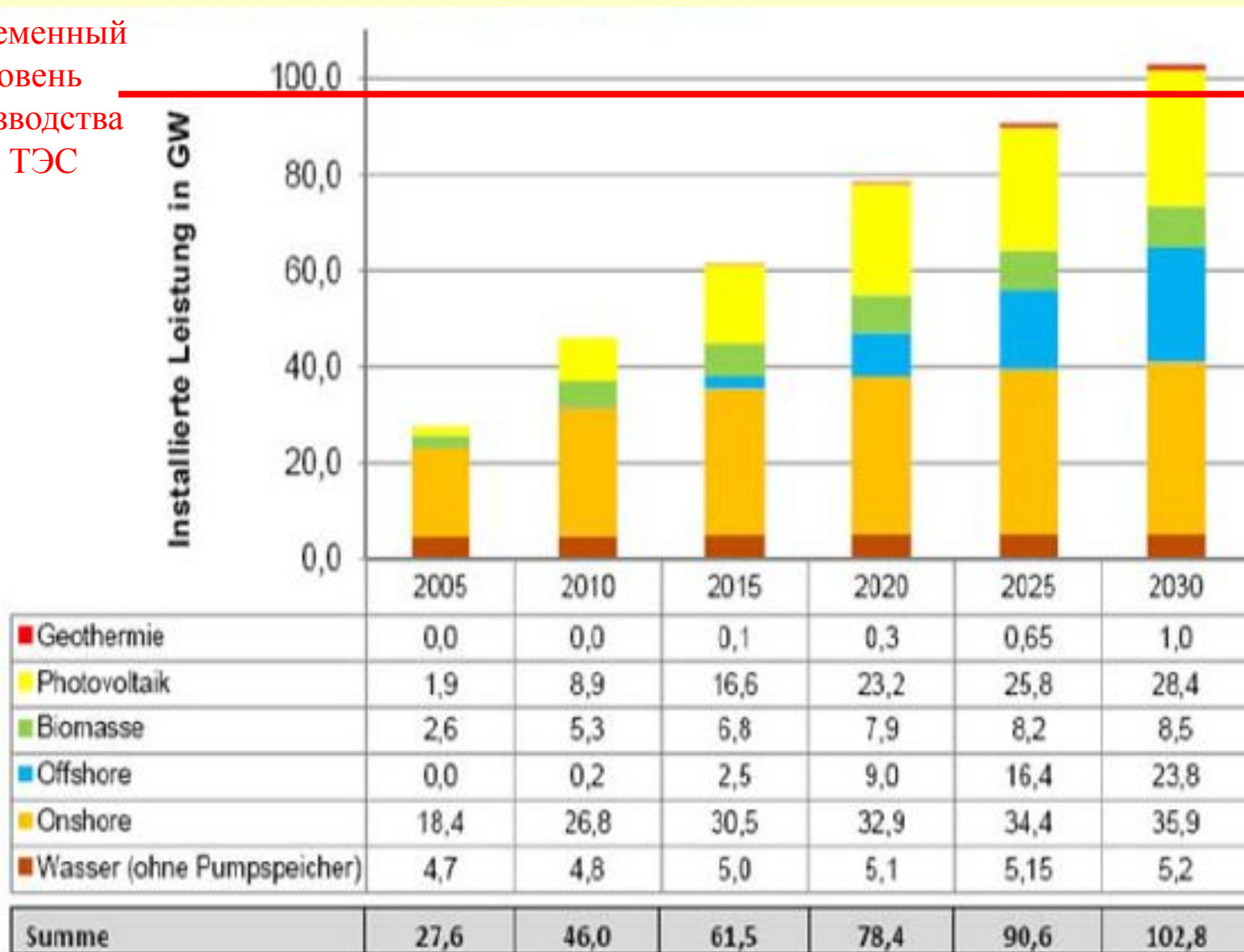
Солнечные батареи



Экспоненциальный рост

План развития возобновляемых источников энергии в Германии

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.

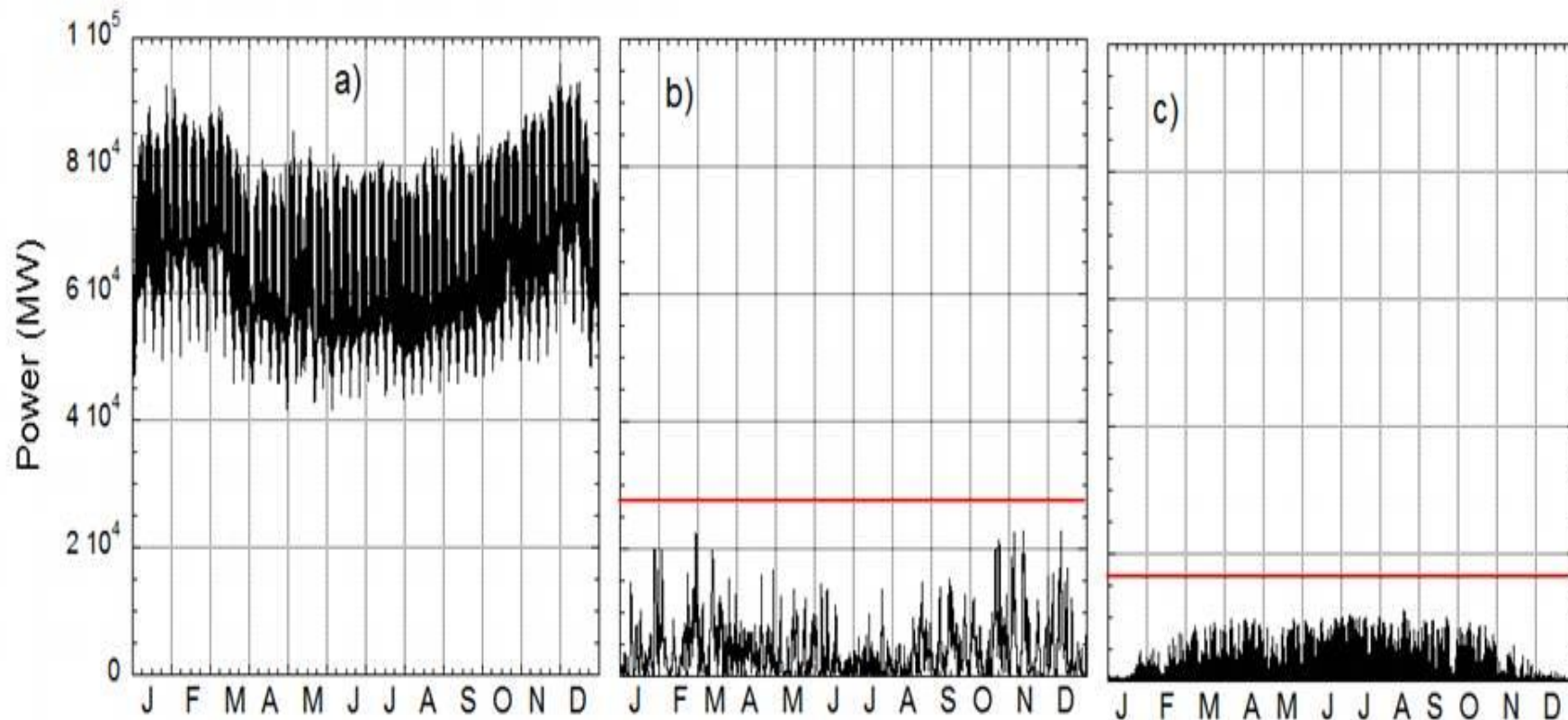
Несмотря на правительственную программу поддержки возобновляемых источников, на ТЭС производят 60% электроэнергии

Потребление и производство электричества в Германии, 2010 г.

Нагрузка

Ветроэлектростанции

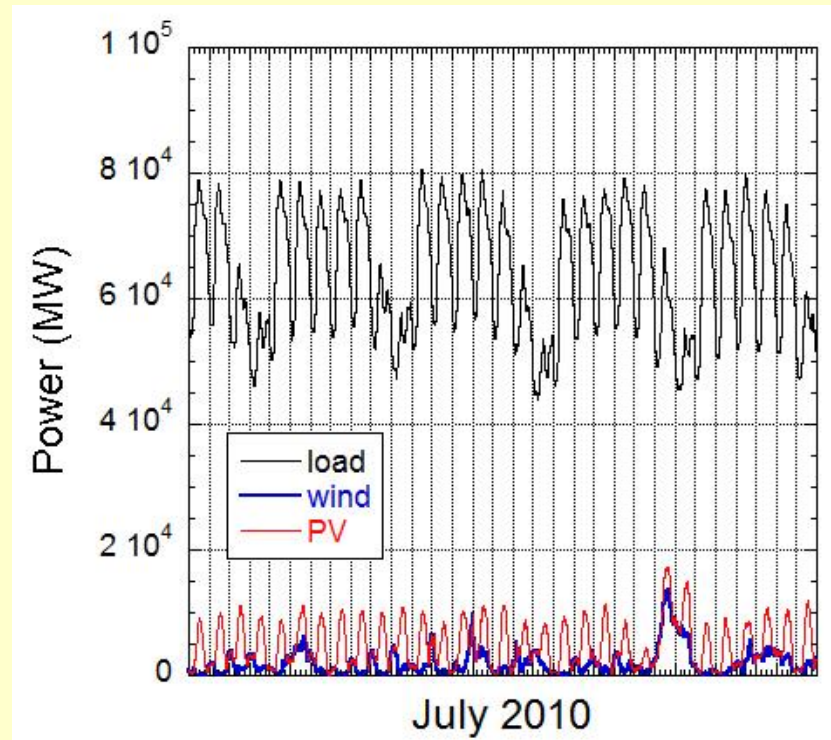
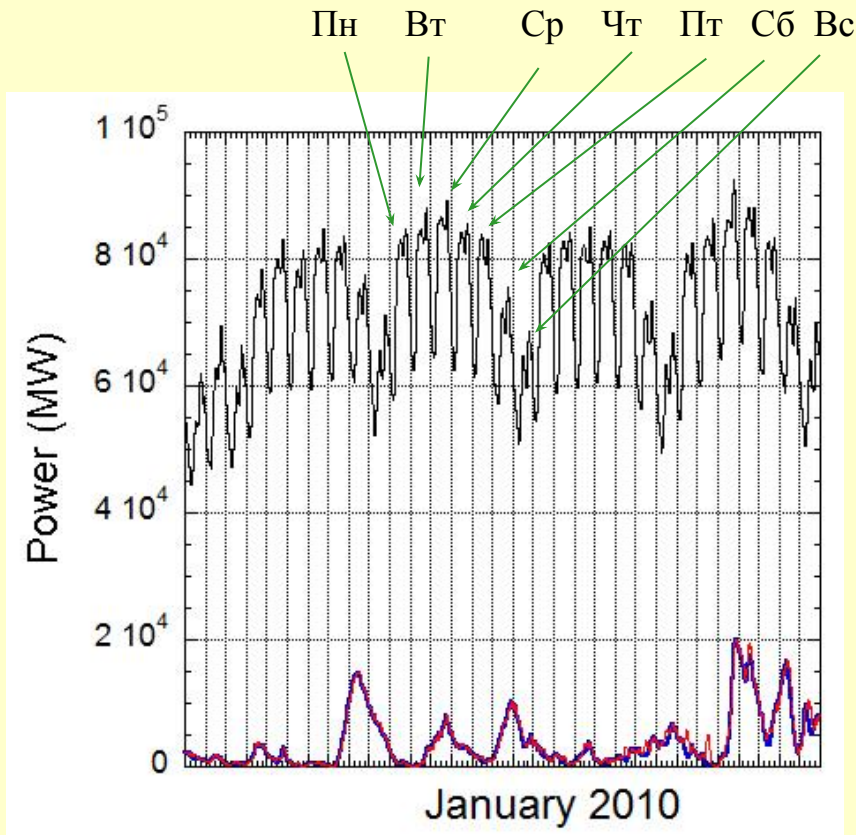
Солнечные батареи



Красными линиями показаны уровни установленной мощности ветроэлектростанций и солнечных батарей.

Видно, что реальная выработка заметно ниже установленной мощности!

Детализация потребления и производства

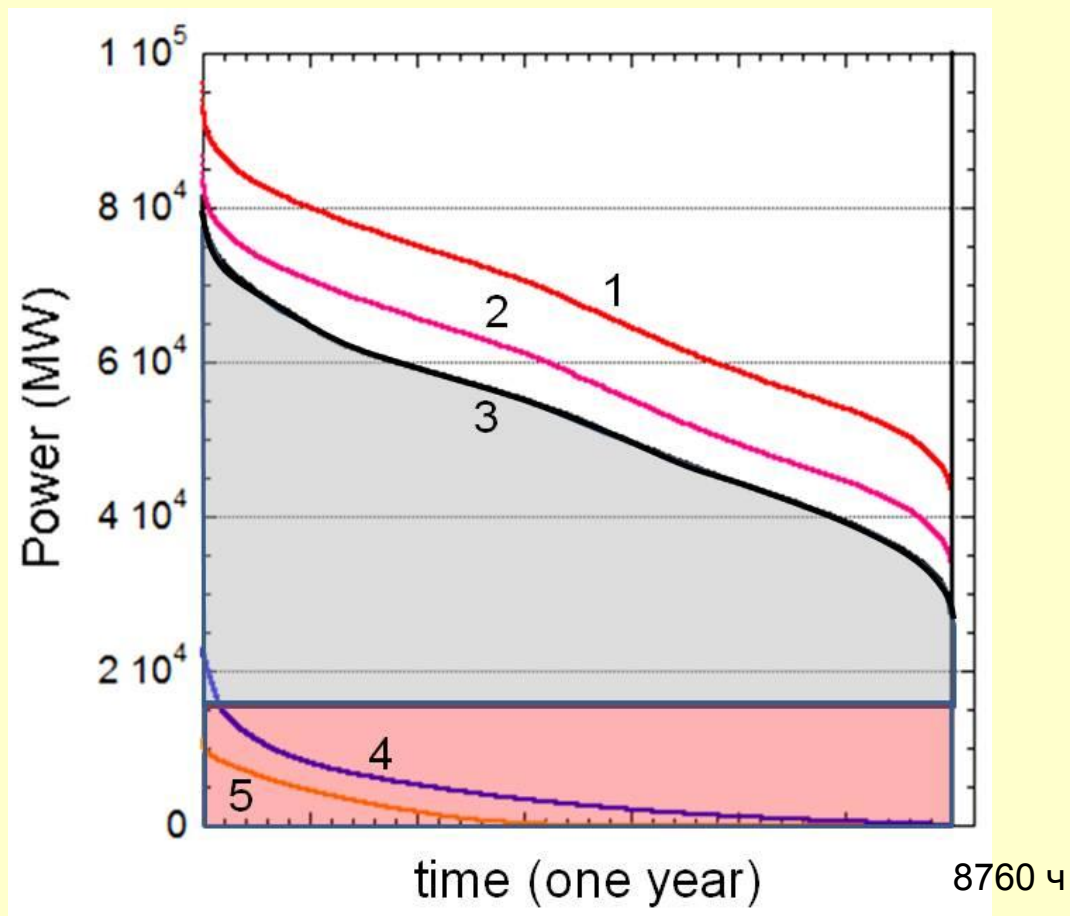


Черные графики – потребление, синие – производство ВЭС, красные – суммарное производство ВЭС и солнечных электростанций.

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.

Темная энергия и материя в космологии

- Полученные в последнее время космологические данные требуют кардинального дополнения современных представлений о структуре материи и о фундаментальных взаимодействиях элементарных частиц. Космологические же данные свидетельствуют о существовании новых типов частиц, ещё не открытых в земных условиях и составляющих «темную материю» во Вселенной.

Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная **везде одинаковая**

Глубокие обзоры галактик



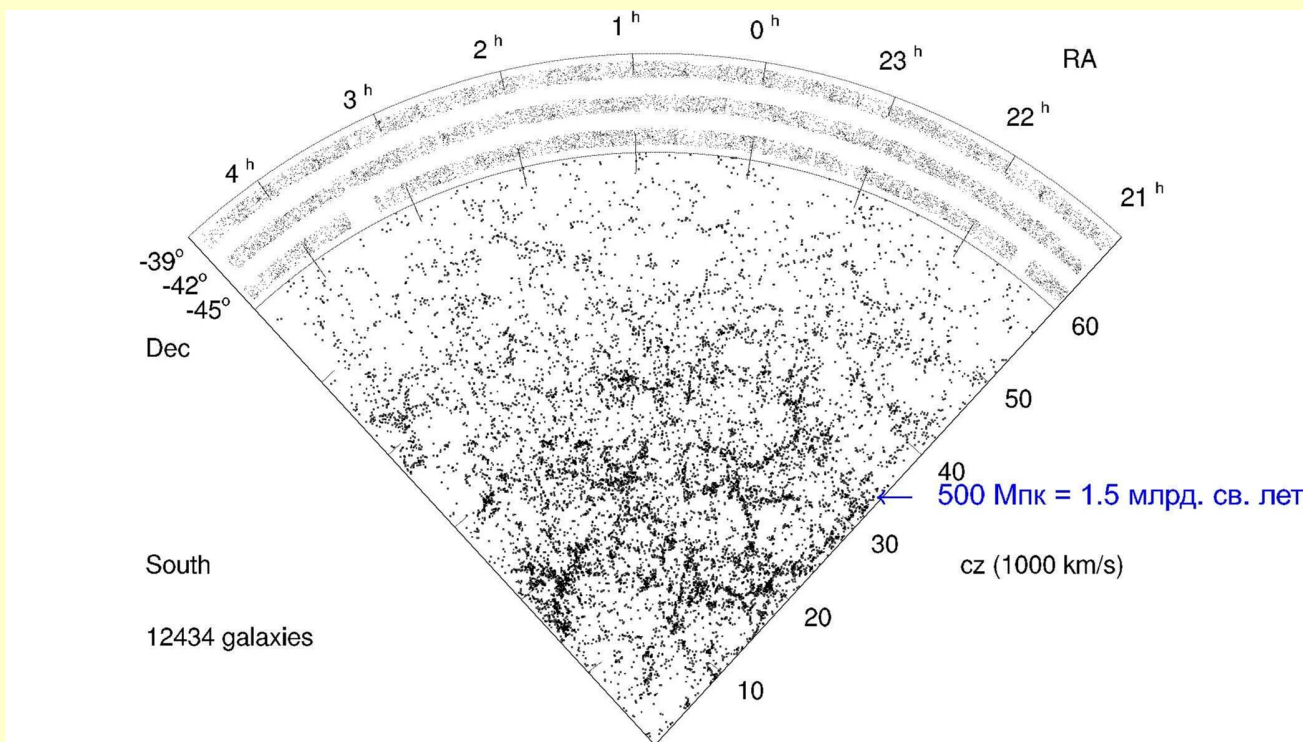
положение во Вселенной более 300 тыс. галактик,
расстояния до 10 млрд. световых лет



карта видимой части Вселенной

Темная энергия и материя в космологии(2)

- Вселенная в целом **однородна**: все области во Вселенной выглядят одинаково. Разумеется, это не относится к небольшим областям: есть области, где много звезд — это галактики; есть области, где много галактик, — это скопления галактик; есть и области, где галактик мало, — это гигантские пустоты. Но области размером 300 миллионов световых лет и больше выглядят все одинаково.



Свойства современной Вселенной:

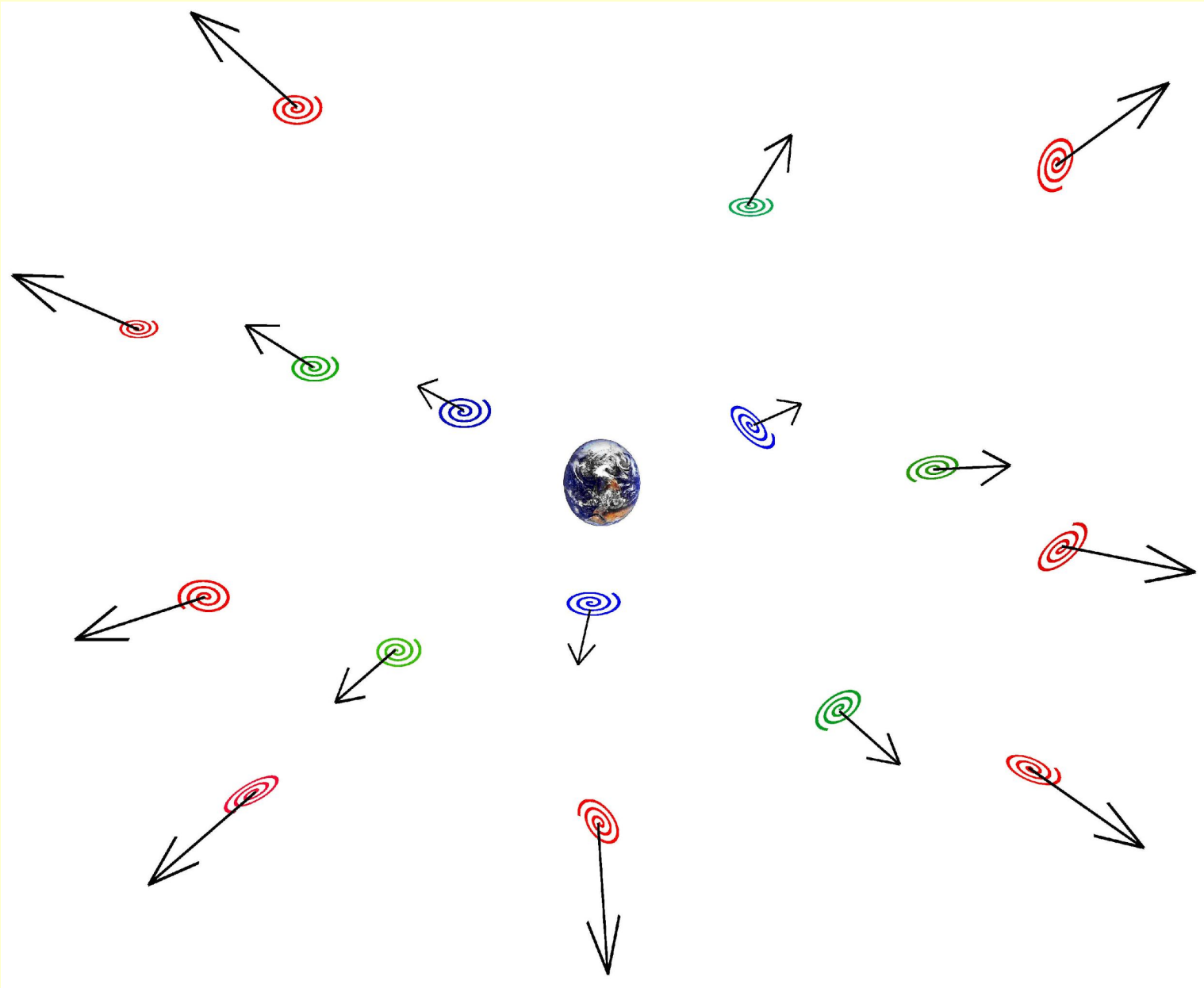
- Видимая Вселенная везде одинаковая
- Вселенная **расширяется**

Пространство растягивается во все стороны.

Галактики удаляются от нас; чем дальше галактика, тем быстрее она убегает (закон Хаббла – конец 1920-х).

Эффект Допплера: свет от далеких галактик приходит к нам покрасневшим

Темная энергия и материя в космологии (4)



Темная энергия и материя в космологии (5)

Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная везде одинаковая
- Вселенная расширяется
- Вселенная “теплая”

Заполнена тепловым электромагнитным излучением
(Пензиас–Вильсон, 1950-е),

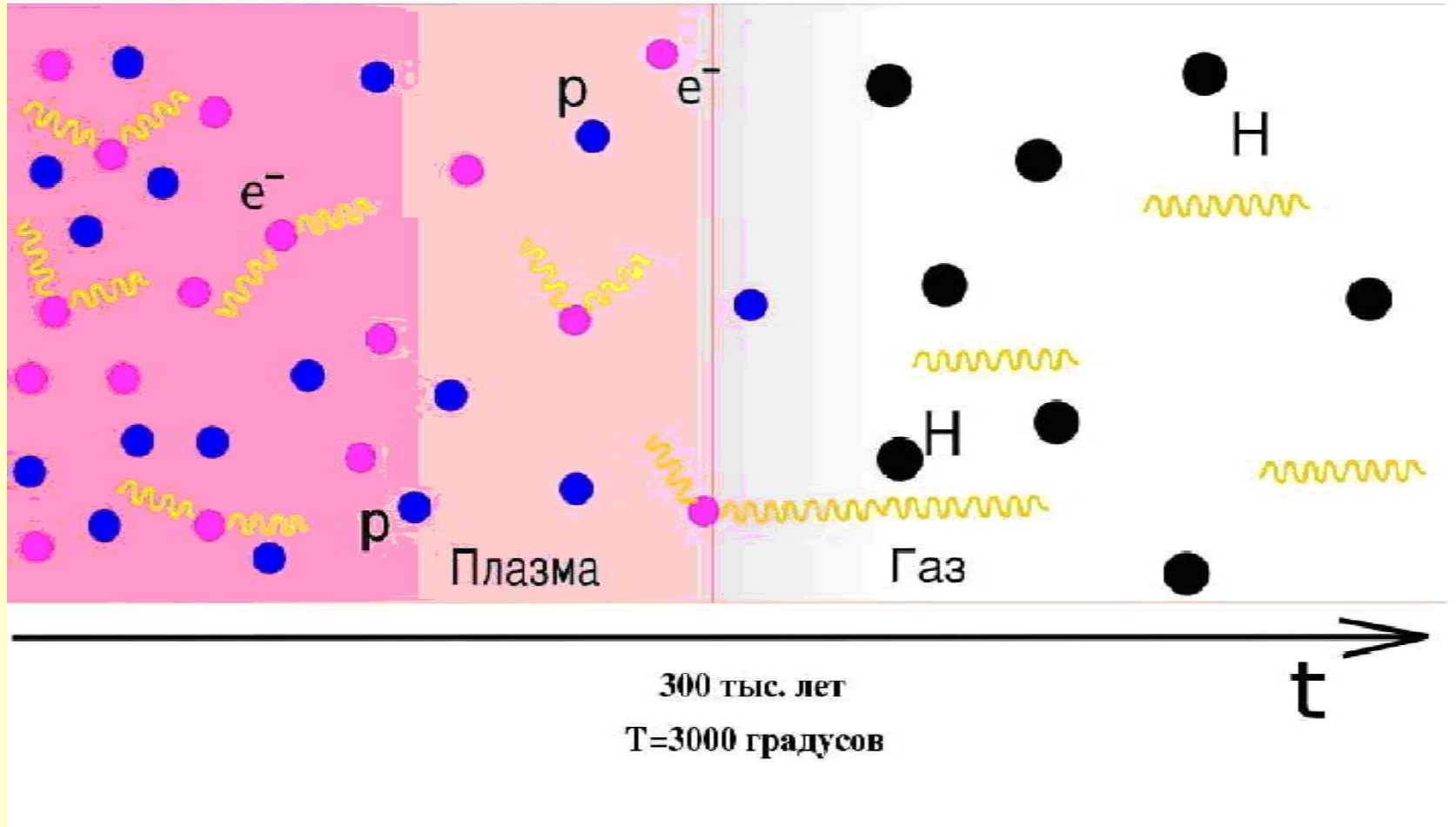
$$T = 2.725 \text{ градусов Кельвина}$$

(ниже температуры жидкого гелия)

В прошлом была гораздо более горячей.
Остыла из-за расширения.

Темная энергия и материя в космологии (6)

Переход плазма-газ



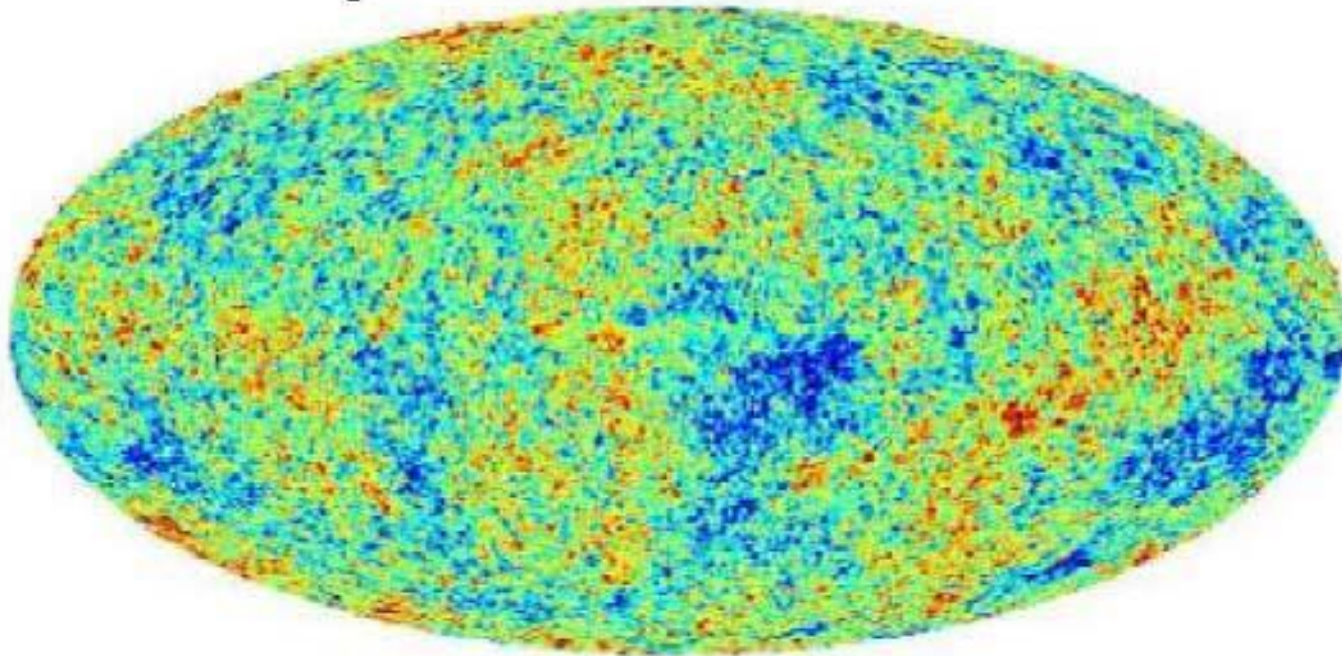
Темная энергия и материя в космологии (7)

- Измерения температуры реликтового излучения в зависимости от направления на небе



фотоснимок Вселенной в возрасте 300 тыс. лет
(сегодня — 14 млрд. лет)

$$T = 2.725 \text{ K}, \quad \frac{\delta T}{T} \sim 10^{-5}$$



– 200 μ K  200 μ K

Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная везде одинаковая
- Вселенная расширяется
- Вселенная “теплая”
- Наше пространство евклидово

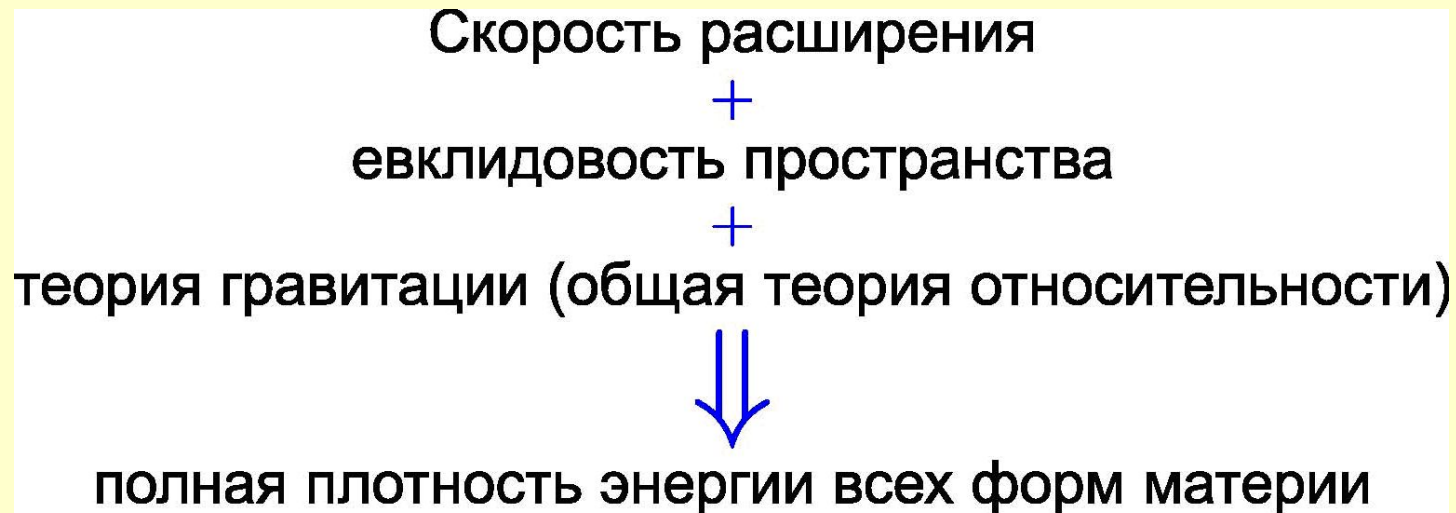
Сумма углов треугольника = 180 градусам.

Речь идет о треугольниках со сторонами
10 млрд. световых лет !

Видимая часть Вселенной – не более 1/100 ее полного объема.

Темная энергия и материя в космологии (9)

- В случае евклидовой геометрии трехмерного пространства общая теория относительности однозначно связывает темп расширения Вселенной с суммарной **плотностью всех форм энергии**, так же как в ньютоновской теории тяготения скорость обращения Земли вокруг Солнца определяется массой Солнца. Измеренный темп расширения соответствует полной плотности энергии в современной Вселенной



$$\epsilon_{\text{полн}} = 5 \cdot \frac{(\text{масс протона}) \cdot c^2}{\text{м}^3}$$

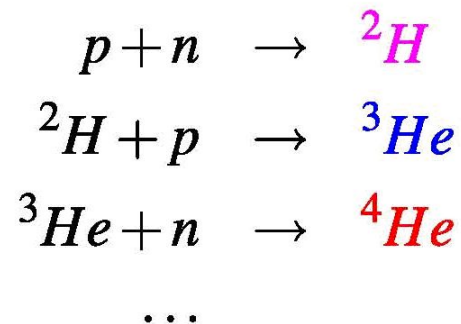
Темная энергия и материя в космологии (10)

Ранняя Вселенная:

- Переход плазма–газ
 $T = 3000$ градусов,
возраст Вселенной = 300 тыс. лет.
- Эпоха **термоядерных реакций**

$T =$ миллиарды градусов

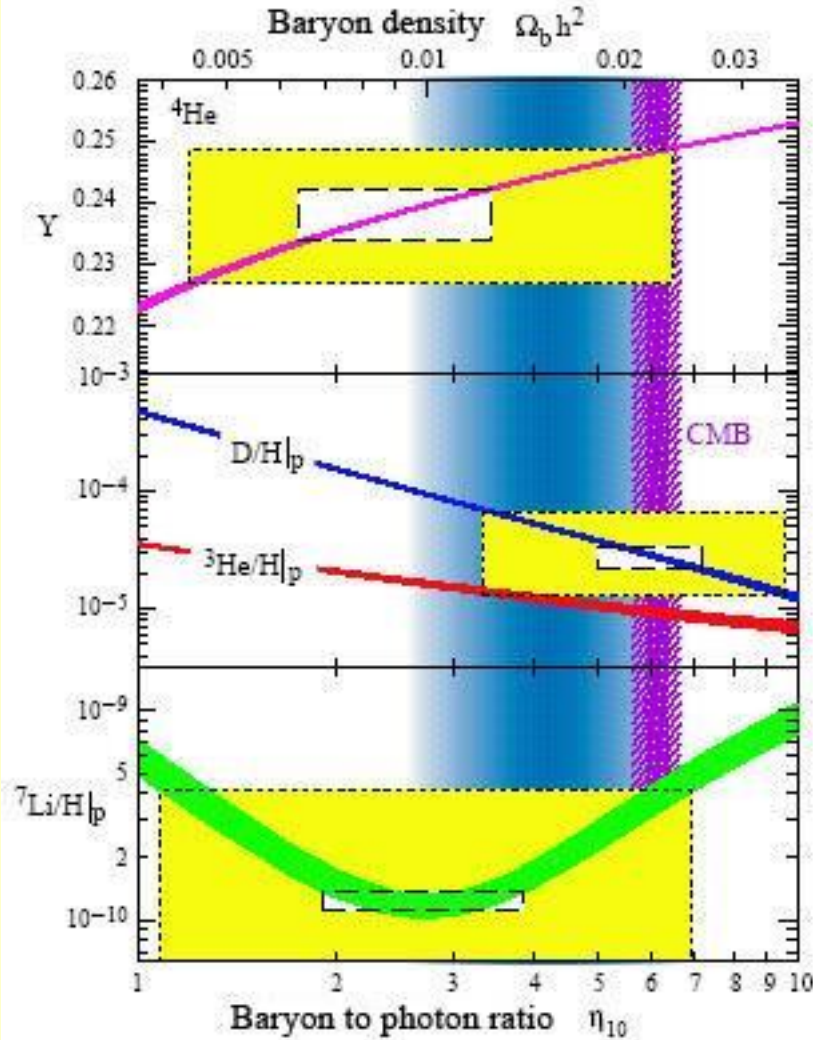
возраст Вселенной = 1 секунда \rightarrow 3 минуты (!)



(1)

Примеси легких элементов измерены

Темная энергия и материя в космологии (11)



- Сравнение этого расчета с наблюдаемым количеством легких элементов во Вселенной приведено на рисунке: линии представляют собой результаты теоретического расчета в зависимости от единственного параметра — плотности обычного вещества (барионов), а прямоугольники — наблюдательные данные. Замечательно, что имеется согласие для всех трех легких ядер (гелия-4, дейтерия и лития-7); Важно, что все эти данные также приводят к выводу о том, что плотность массы обычного вещества в современной Вселенной составляет

$$\varepsilon / c^2 = 0.25 \text{ масс протона} / \text{м}^3$$

Темная энергия и материя в космологии (12)

Сравнение наблюдений примеси легких элементов с теорией:

- Проверка теоретического описания ранней Вселенной через 1 секунду после Большого Взрыва
- Измерение плотности обычного вещества тогда \Rightarrow сейчас
В современной Вселенной

$$n_B = 0.25 \cdot \frac{\text{протонов}}{\text{м}^3}$$

$$\epsilon_B = 0.25 \cdot \frac{(\text{масс протона}) \cdot c^2}{\text{м}^3}$$

$$\frac{\epsilon_B}{\epsilon_{\text{полн}}} = 0.05$$

Независимая проверка: наблюдения реликтового излучения

Темная энергия и материя в космологии (13)

- Из снимка реликтового излучения можно установить, какова была **величина** (амплитуда) **неоднородностей** температуры и плотности в ранней Вселенной — она составляла 10^{-4} – 10^{-5} от средних значений. Именно из этих неоднородностей плотности возникли галактики и скопления галактик: области с более высокой плотностью притягивали к себе окружающее вещество за счет гравитационных сил, становились еще более плотными и в конечном итоге образовывали галактики.
- Поскольку начальные неоднородности плотности известны, процесс образования галактик можно рассчитать и результат сравнить с наблюдаемым распределением галактик во Вселенной.
- Эти данные приводят к выводу о том, что плотность массы обычного вещества в современной Вселенной составляет

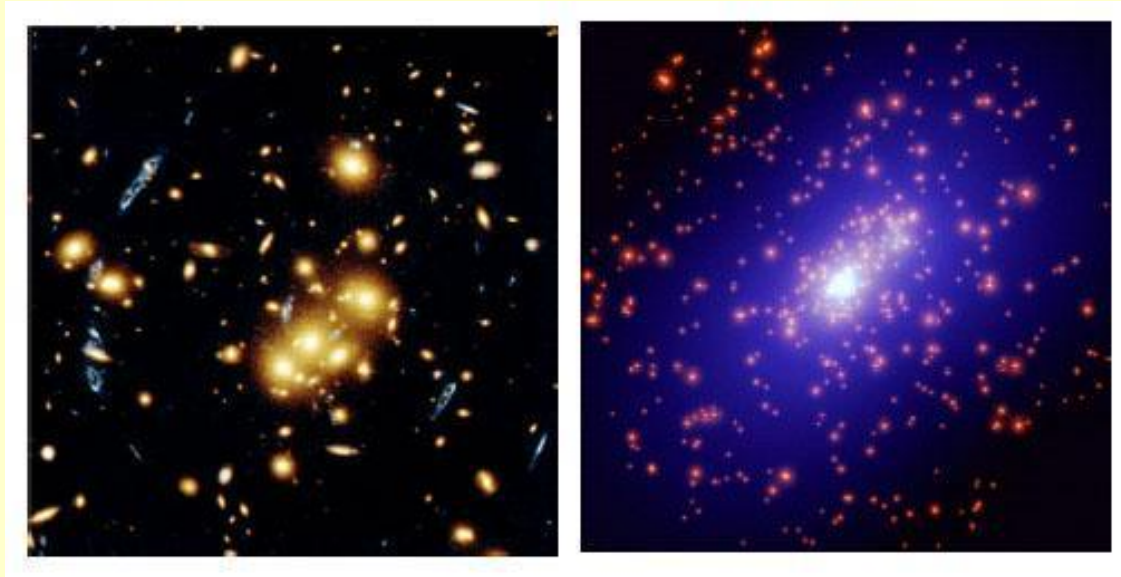
$$\varepsilon / c^2 = 0.25 \text{ масс протона} / \text{м}^3$$

- т. е. обычное вещество вкладывает всего 5% в полную плотность энергии во Вселенной.

Темная энергия и материя в космологии (14)

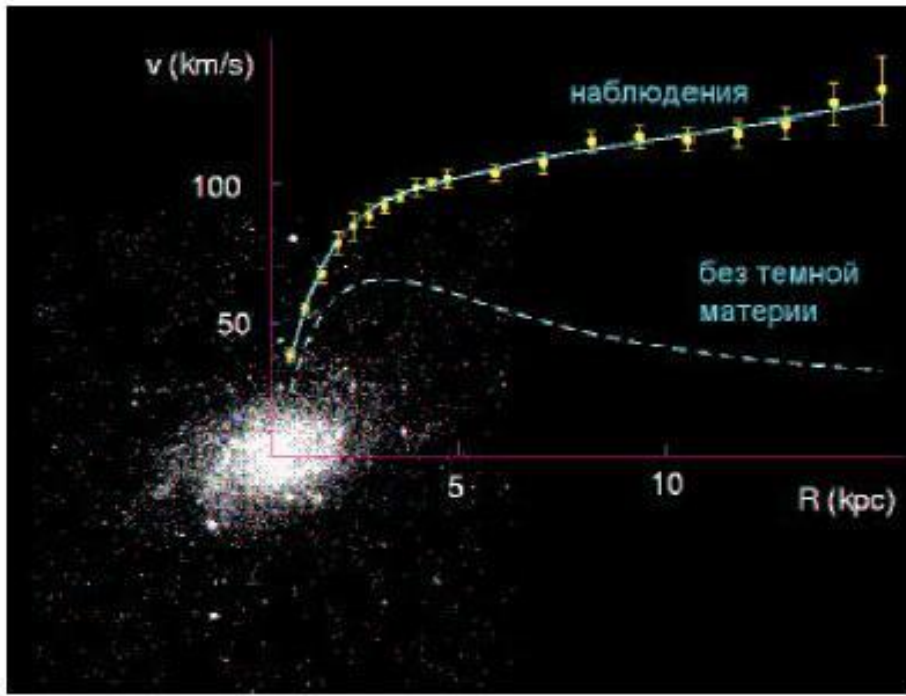
- Темная материя сродни обычному веществу в том смысле, что она способна собираться в сгустки (размером, скажем, с галактику или скопление галактик) и участвует в гравитационных взаимодействиях так же, как обычное вещество. Скорее всего, она состоит из новых, не открытых еще в земных условиях частиц.
- Помимо космологических данных, в пользу существования темной материи служат измерения гравитационного поля в скоплениях галактик и в галактиках. Имеется несколько способов измерения гравитационного поля в скоплениях галактик, один из которых — гравитационное линзирование, проиллюстрированное на следующем рисунке.

Темная энергия и материя в космологии (15)



- Гравитационное поле скопления искривляет лучи света, испущенные галактикой, находящейся за скоплением, т. е. гравитационное поле действует как линза. При этом иногда появляются несколько образов этой удаленной галактики; на левой половине рис. они имеют голубой цвет. Искривление света зависит от распределения массы в скоплении, независимо от того, какие частицы эту массу создают. Восстановленное таким образом распределение массы показано на правой половине рис. голубым цветом; видно, что оно сильно отличается от распределения светящегося вещества. Измеренные подобным образом массы скоплений галактик согласуются с тем, что темная материя вкладывает около 25% в полную плотность энергии во Вселенной.

Темная энергия и материя в космологии (16)



• Темная материя имеется и в галактиках. Это опять-таки следует из измерений гравитационного поля, теперь уже в галактиках и их окрестностях. Чем сильнее гравитационное поле, тем быстрее вращаются вокруг галактики звезды и облака газа, так что измерения скоростей вращения в зависимости от расстояния до центра галактики позволяют восстановить распределение массы в ней.

• Это проиллюстрировано на рисунке: по мере удаления от центра галактики скорости обращения не уменьшаются, что говорит о том, что в галактике, в том числе вдалеке от её светящейся части, имеется несветящаяся, темная материя. Измеренные подобным образом массы скоплений галактик также согласуются с тем, что темная материя вкладывает около 25% в полную плотность энергии во Вселенной.

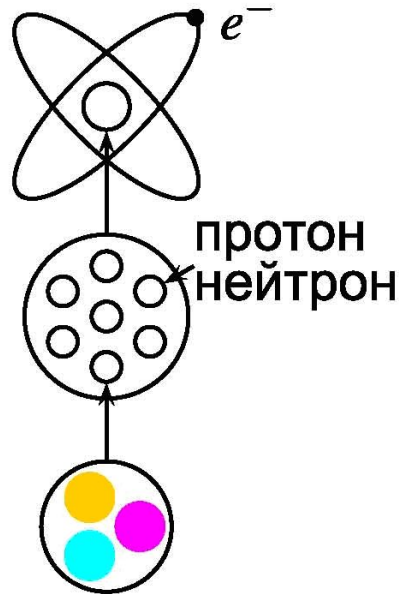
• По таким измерениям в нашей Галактике в окрестности Солнца масса темной материи примерно равна массе обычного вещества

Темная энергия и материя в космологии(17)

Известные элементарные частицы

лептоны

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$



три семейства частиц

кварки

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

+ АНТИЧАСТИЦЫ

e^+ : позитрон, ...
 $\bar{\nu}_e$: антинейтрино, ...
 \bar{u} : антикварки, ...

+ частицы, ответственные за взаимодействия

Темная энергия и материя в космологии(18)

Природа темной материи — область гипотез

Скорее всего

- темная материя = неизвестные тяжелые частицы, электрически нейтральные.
- $(1000-10^4) \frac{1}{\text{М}^3}$ здесь и сейчас
- Нет среди известных частиц
- Стабильные. Слабо взаимодействуют с веществом.
- Новые симметрии фундаментальных взаимодействий

Темная энергия и материя в космологии(19)

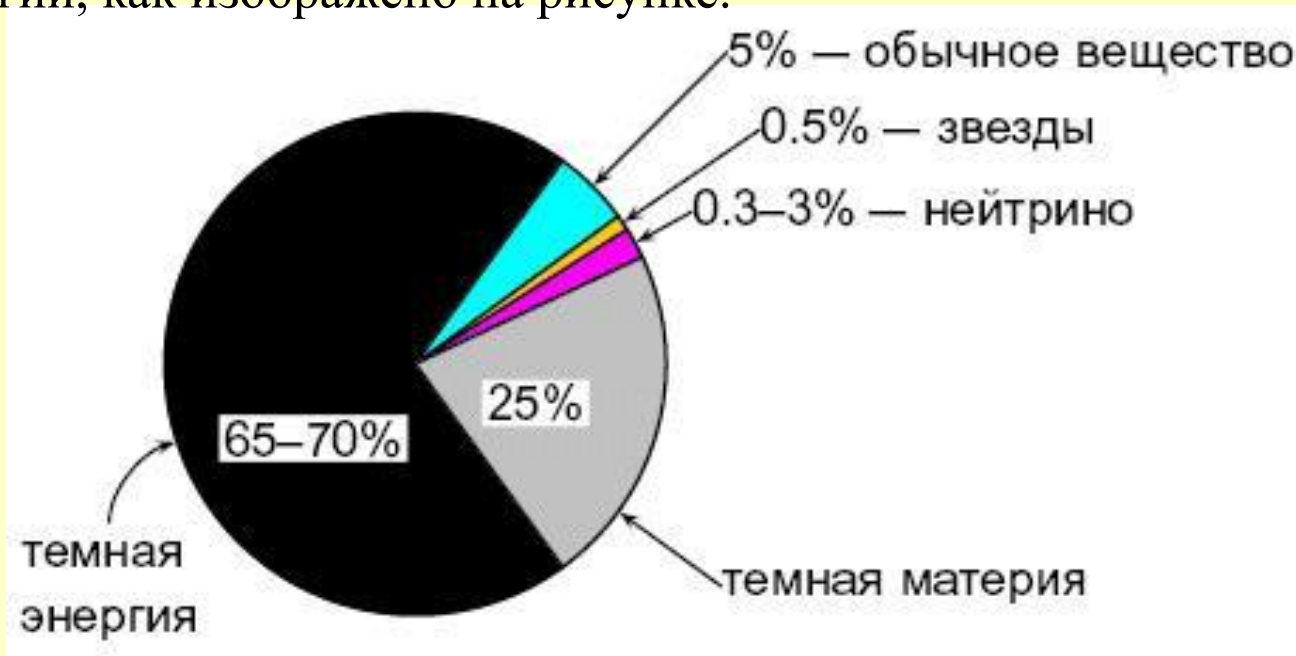
- Наиболее правдоподобная гипотеза:
новые, пока не открытые элементарные частицы массы $m = 100\text{--}1000$ масс протона, взаимодействующие, хотя и слабо, с обычным веществом

Новая физика при энергиях, доступных для изучения сейчас и в недалеком будущем

- Скорее всего, частица темной материи – лишь один из членов нового семейства элементарных частиц.

Темная энергия и материя в космологии (20)

- Итак, доля обычного вещества (протонов, атомных ядер, электронов) в суммарной энергии в современной Вселенной составляет всего 5%. При этом вещества в звездах ещё в 10 раз меньше; обычное вещество находится в основном в облаках газа. Помимо обычного вещества во Вселенной имеются и реликтовые нейтрино — около 300 нейтрино всех типов в кубическом сантиметре. Их вклад в полную энергию (массу) во Вселенной невелик, поскольку массы нейтрино малы, и составляет заведомо не более 3%. Оставшиеся 90–95% полной энергии во Вселенной — «неизвестно что». Более того, это «неизвестно что» состоит из двух фракций — темной материи и темной энергии, как изображено на рисунке.



Темная энергия и материя в космологии (21)

- Темная энергия — гораздо более странная субстанция, чем темная материя. Она не собирается в сгустки, а равномерно «разлита» во Вселенной. В галактиках и скоплениях галактик её столько же, сколько вне их. Самое необычное то, что темная энергия в определенном смысле испытывает **антигравитацию**.
- Современными астрономическими методами можно не только измерить нынешний темп расширения Вселенной, но и определить, как он изменялся со временем. Астрономические наблюдения свидетельствуют о том, что сегодня (и в недалеком прошлом) Вселенная расширяется с ускорением: темп расширения растет со временем. В этом смысле и можно говорить об антигравитации: обычное гравитационное притяжение замедляло бы разбегание галактик, а в нашей Вселенной, получается, всё наоборот.
- Один из кандидатов на роль темной энергии — вакуум. Плотность энергии вакуума не изменяется при расширении Вселенной, а это и означает отрицательное давление вакуума. Изменение энергии при изменении объема определяется давлением, $\Delta E = -p\Delta V$. При расширении Вселенной энергия вакуума растет вместе с объемом (плотность энергии постоянна), что возможно, только если давление вакуума отрицательно.

Темная энергия и материя в космологии (22)

- Другой кандидат — новое сверхслабое поле, пронизывающее всю Вселенную; для него употребляют термин «квинтэссенция». Есть и другие кандидаты, но в любом случае темная энергия представляет собой что-то совершенно необычное.
- Другой путь объяснения ускоренного расширения Вселенной состоит в том, чтобы предположить, что сами законы гравитации видоизменяются на космологических расстояниях и космологических временах. Такая гипотеза далеко не безобидна: попытки обобщения общей теории относительности в этом направлении сталкиваются с серьезными трудностями.
- Как часто бывает в науке, впечатляющие успехи физики частиц и космологии поставили неожиданные и фундаментальные вопросы. Мы сегодня не знаем, что представляет собой основная часть материи во Вселенной. Мы можем только догадываться, какие явления происходят на сверхмалых расстояниях, и какие процессы происходили во Вселенной на самых ранних этапах её эволюции. **Можно надеется, что на многие из этих вопросов ответы будут найдены в обозримом будущем — в течение 10–15 лет, а может быть, и раньше. Наше время — это время кардинального изменения взгляда на природу, и главные открытия здесь еще впереди.**