

НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



Российские сценарии для рынка бэк-энд

(Замкнутый ЯТЦ, как необходимое условие инвестиционной привлекательности ЯЭ)

Субботин С.А.

Круглый стол:

Моделирование и ИТ-обеспечение в сфере бэк-энд: стратегия, технологии, управление

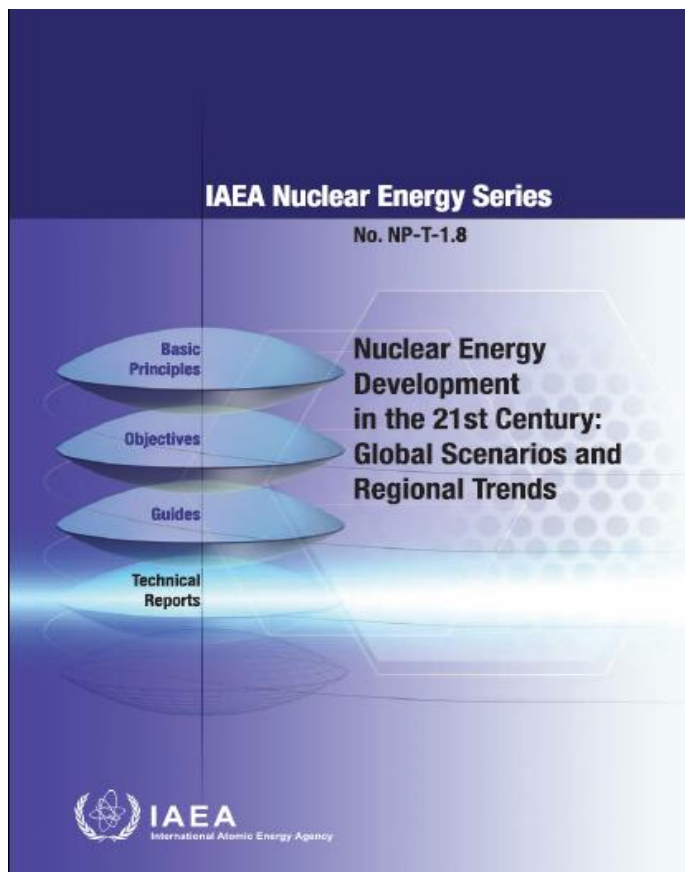
**МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ
«АТОМЭКСПО 2014»**

Москва • 9 - 11 июня 2014 год • Гостиный Двор

В основном доклад основывается на следующих работах:

«О стратегии ядерной энергетики России до 2050 года» Доклад на Ученый Совет Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» 29.09.2011

И



Сложность современной ситуации на энергетических рынках:

- С увеличением масштабов **задача стала существенно нелинейной**.
- В силу глобализации экономики любая региональная **система энергетики стала открытой**, для которой внешние граничные условия стали не менее определяющими, чем внутренние планы и возможности.
- Масштабы и открытость системы, в свою очередь, порождает **процессы**, которые затрудняют не только устойчивое развитие, но и приводят к **различного рода возмущениям, колебаниям, циклам**.
- **Системы**, которые ранее вели себя предсказуемо с точки зрения экономики и политики, **начинают хаотизироваться и важно выявить коридор устойчивости систем** относительно разного рода угроз и возмущений и искать пути возврата их в допустимый «коридор».
- Для этого **следует рассмотреть как природные, так и экономические факторы**, ведущие к различного рода возмущениям при развитии энерготехнологий, учитывать не только мегатренды, но и слабые сигналы в поведении систем.

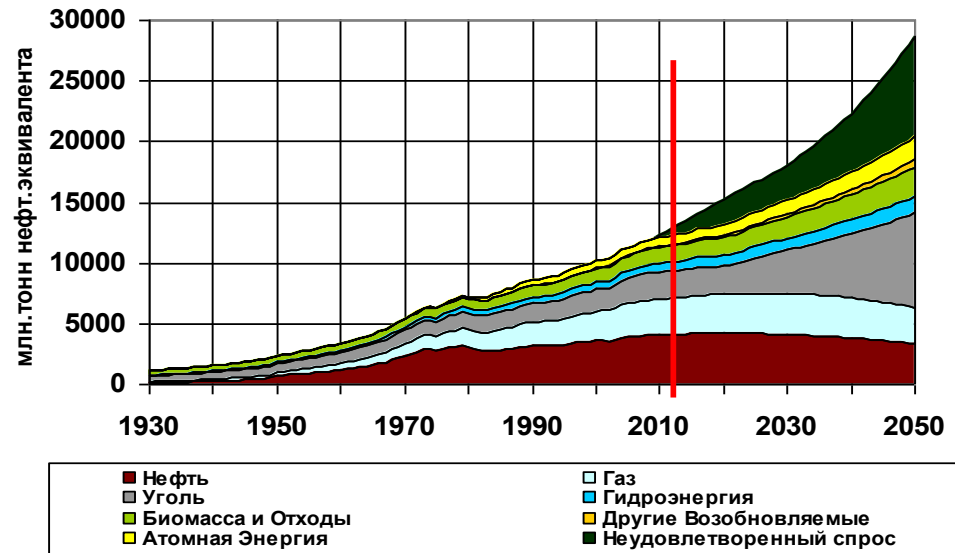
Прогноз ситуации

«Мир приближается к состоянию, когда дефицит ресурсов (в первую очередь энергетических) будет оказывать доминантное воздействие на все сферы жизни людей. Сколь далеко это время, можно гадать, но, наверное, только реальная практика заставит людей искать варианты решения своих проблем коллективно, понимая, что отдельно им справиться с проблемой будет невозможно.»

ЭНЕРГЕТИКА В ЭКОНОМИКЕ 21 ВЕКА.

Велихов Е.П., Гагаринский А.Ю., Субботин С.А., Цибульский В.Ф. ИздАт., 2010 год

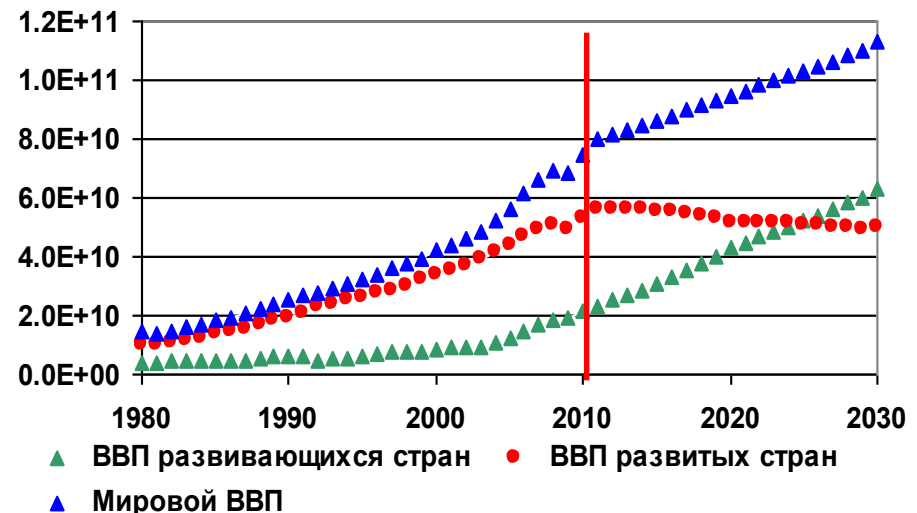
Баланс первичных энергоисточников в мире



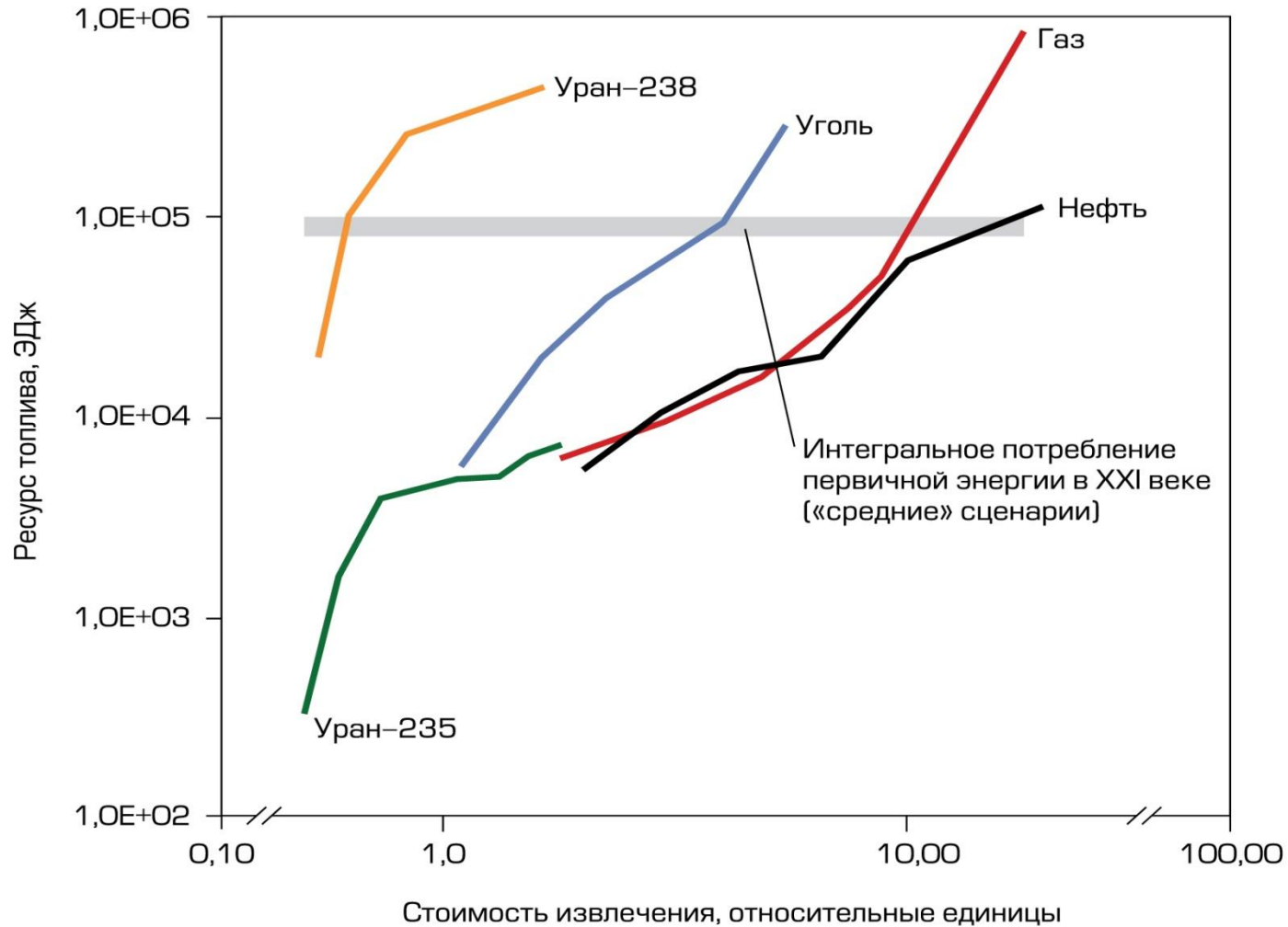
Доля первичных энергоисточников в ВВП



ВВП развитых и развивающихся стран



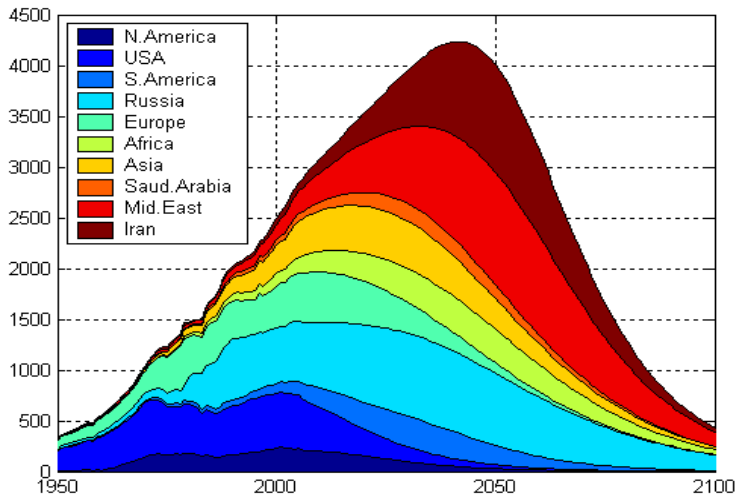
Зависимость доступности ресурсов ископаемого топлива от стоимости их извлечения



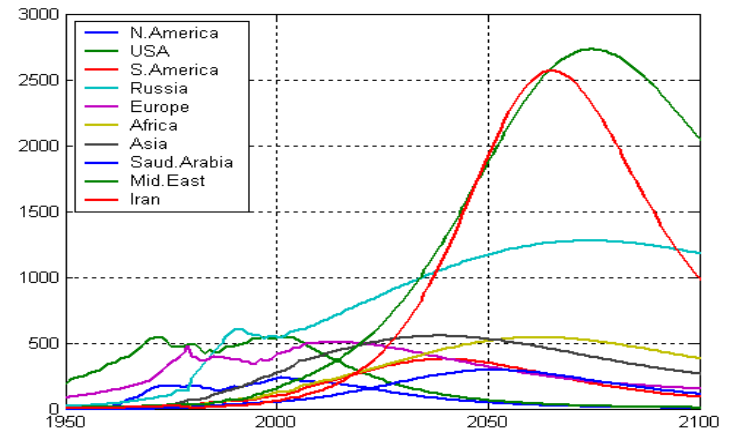
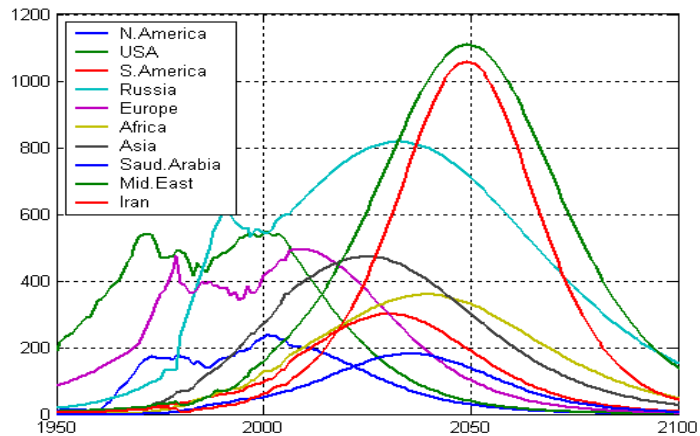
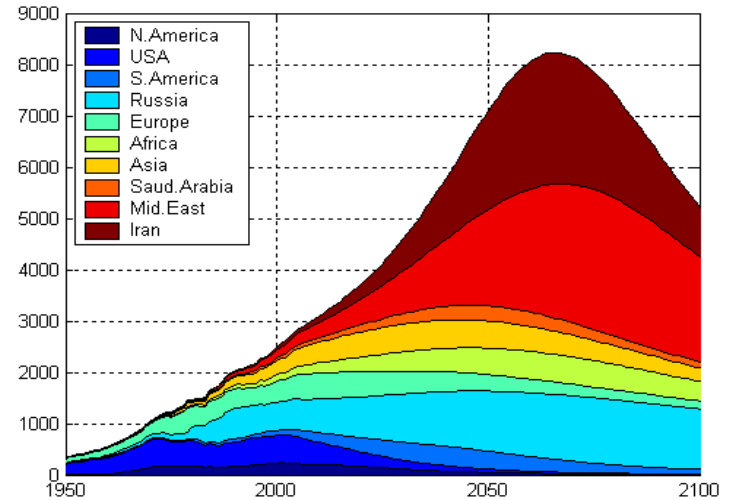
Добыча газа

(2005:уже добыто 86 трлн. куб.м ; доказанные резервы 180 трлн.. куб.м)

300 трлн. куб.м

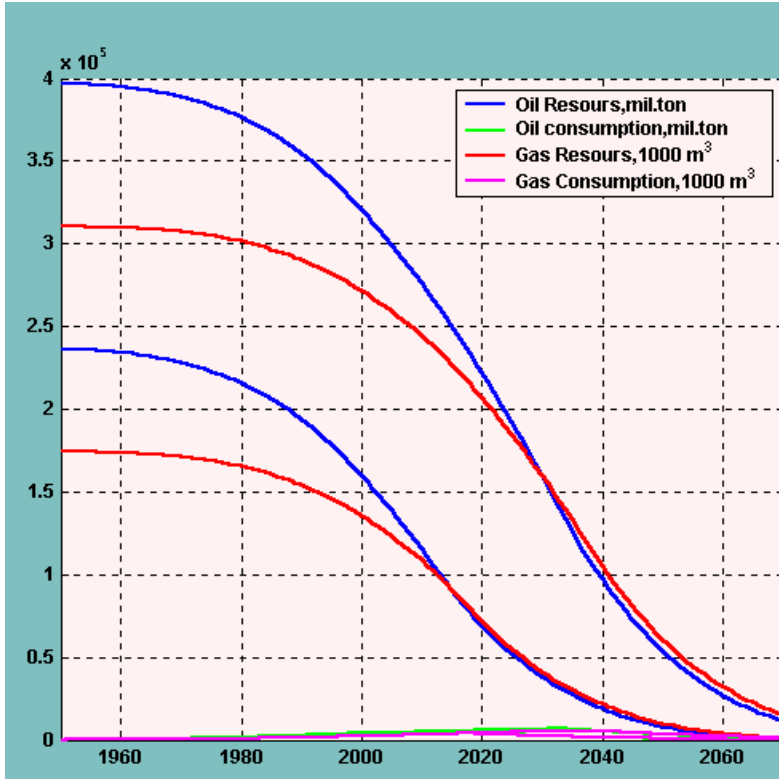


800 трлн. куб.м

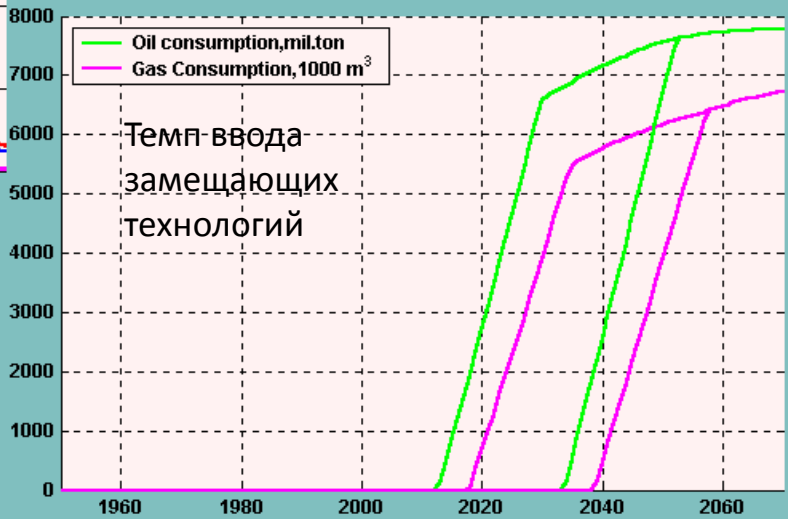
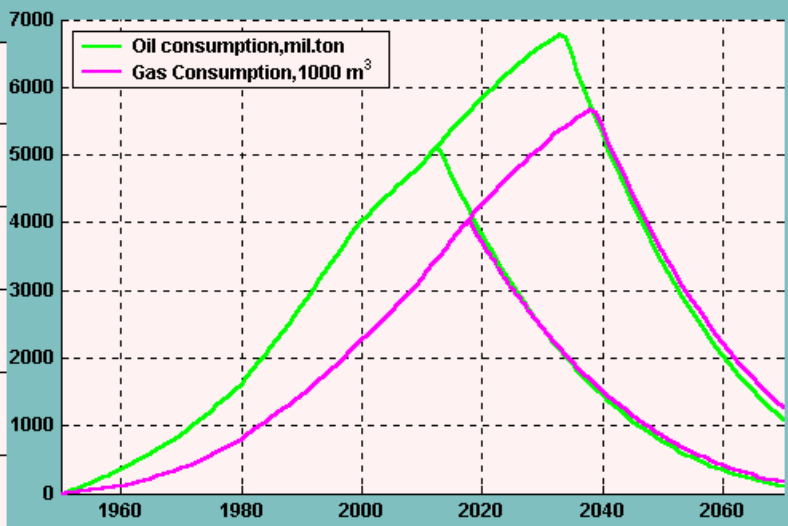


IEA, Global Energy Outlook, 2003. **Ресурсы и потребление нефти и газа** (современные оценки и в 2 раза увеличенные ресурсы) Критическим моментом является не ограниченность ресурсов, а темпы ввода новых месторождений в необходимых масштабах.

Темп истощения ресурса

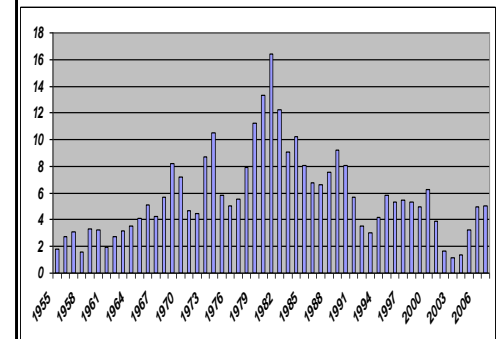
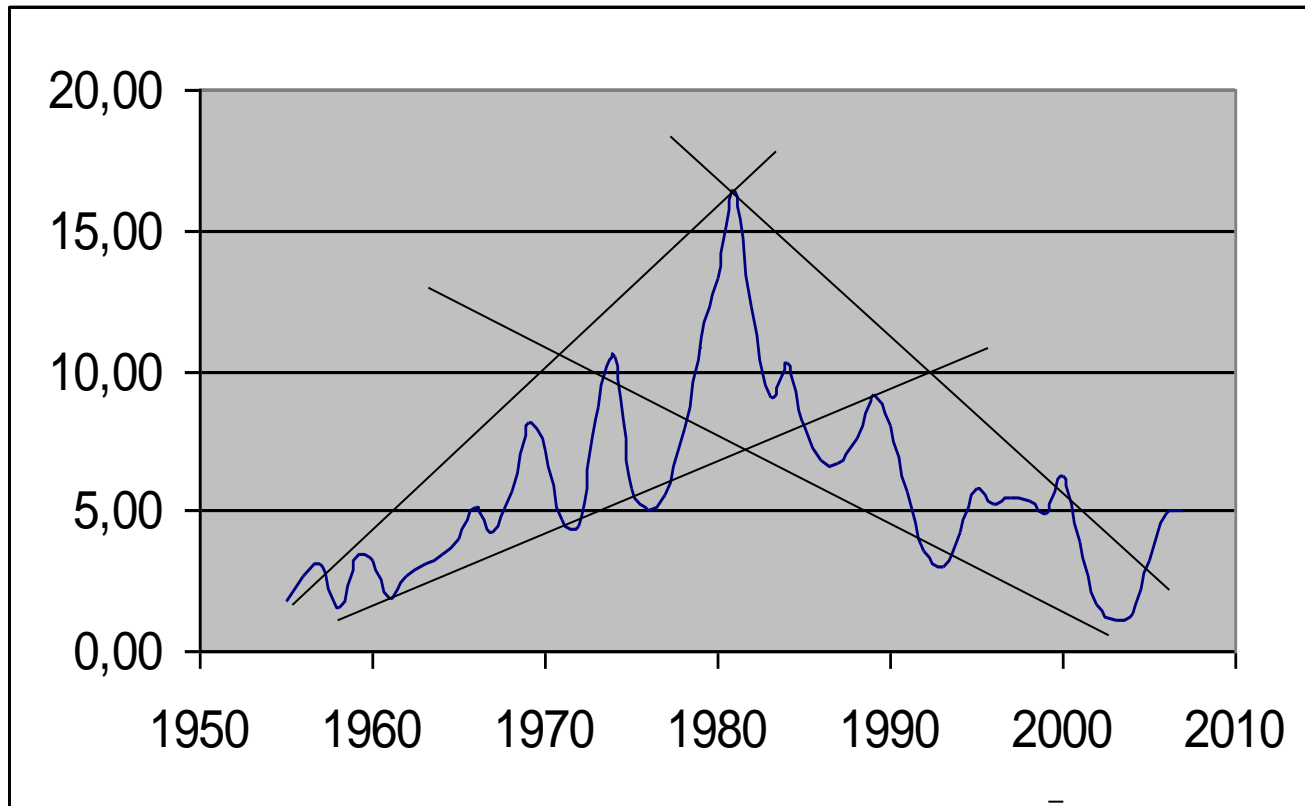


Развитие технологий



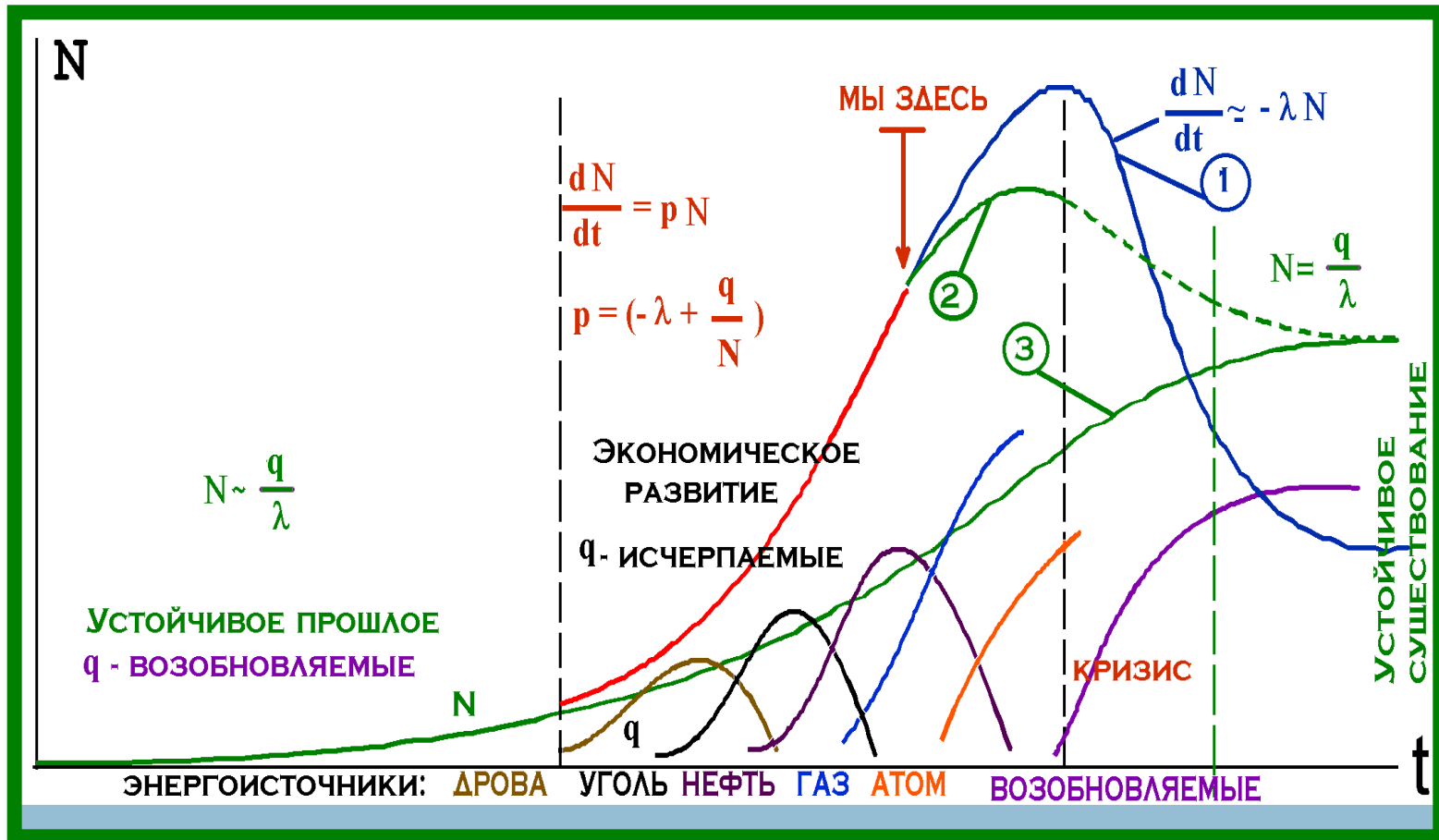
	T -Resource End	T -current cons.
OIL	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="80"/>
GAS	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="120"/>

Динамика изменения учетной ставки (primary discount rate) ФРС США



Discount rate: In the context of the GIF guidelines, the discount rate is equal to the real cost of money. **GIF/EMWG/2007/004** - *Учетная ставка или ставка рефинансирования по сути является реальной стоимостью денег*

Моделирование развития энергетики

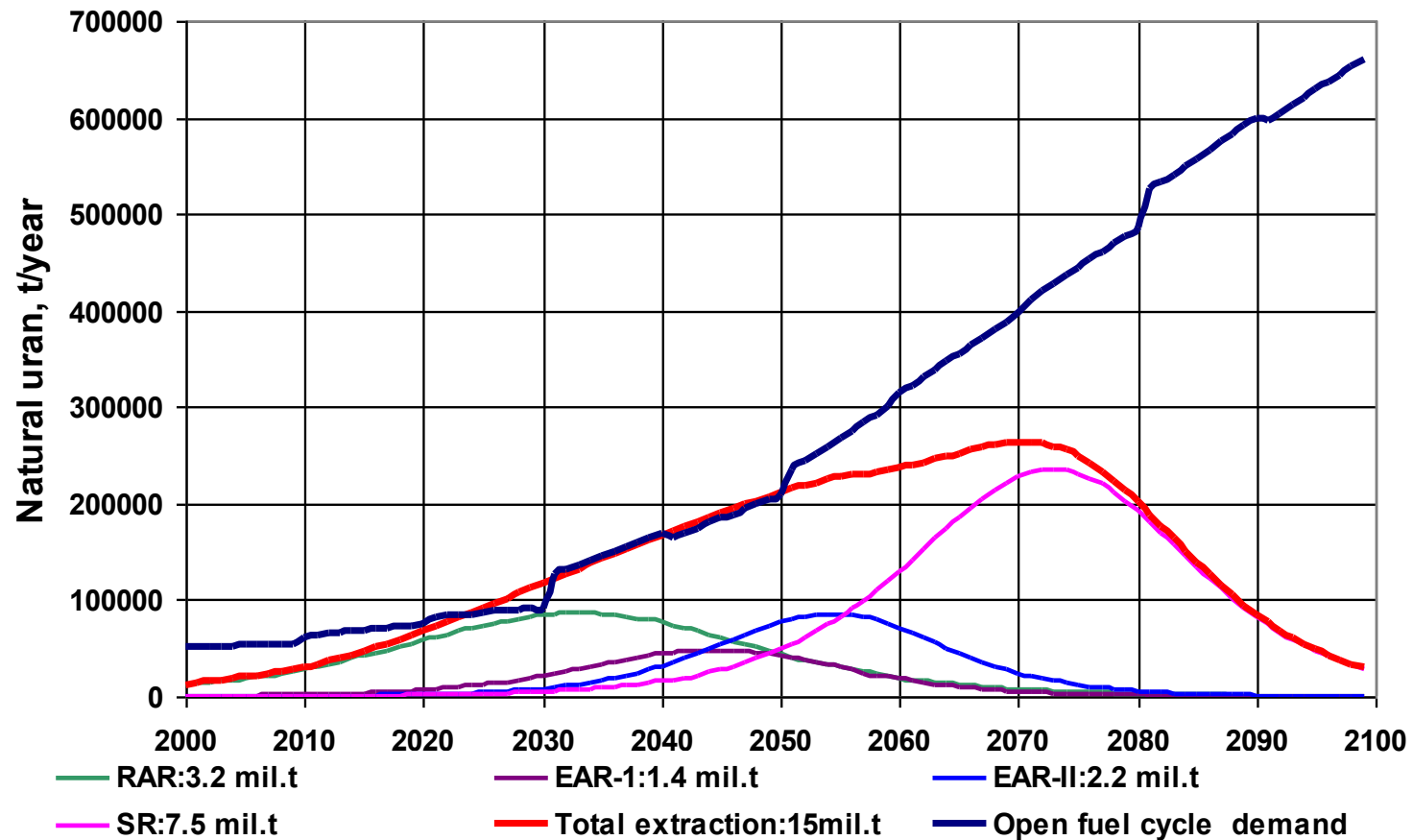


Изменение богатства общества во времени.

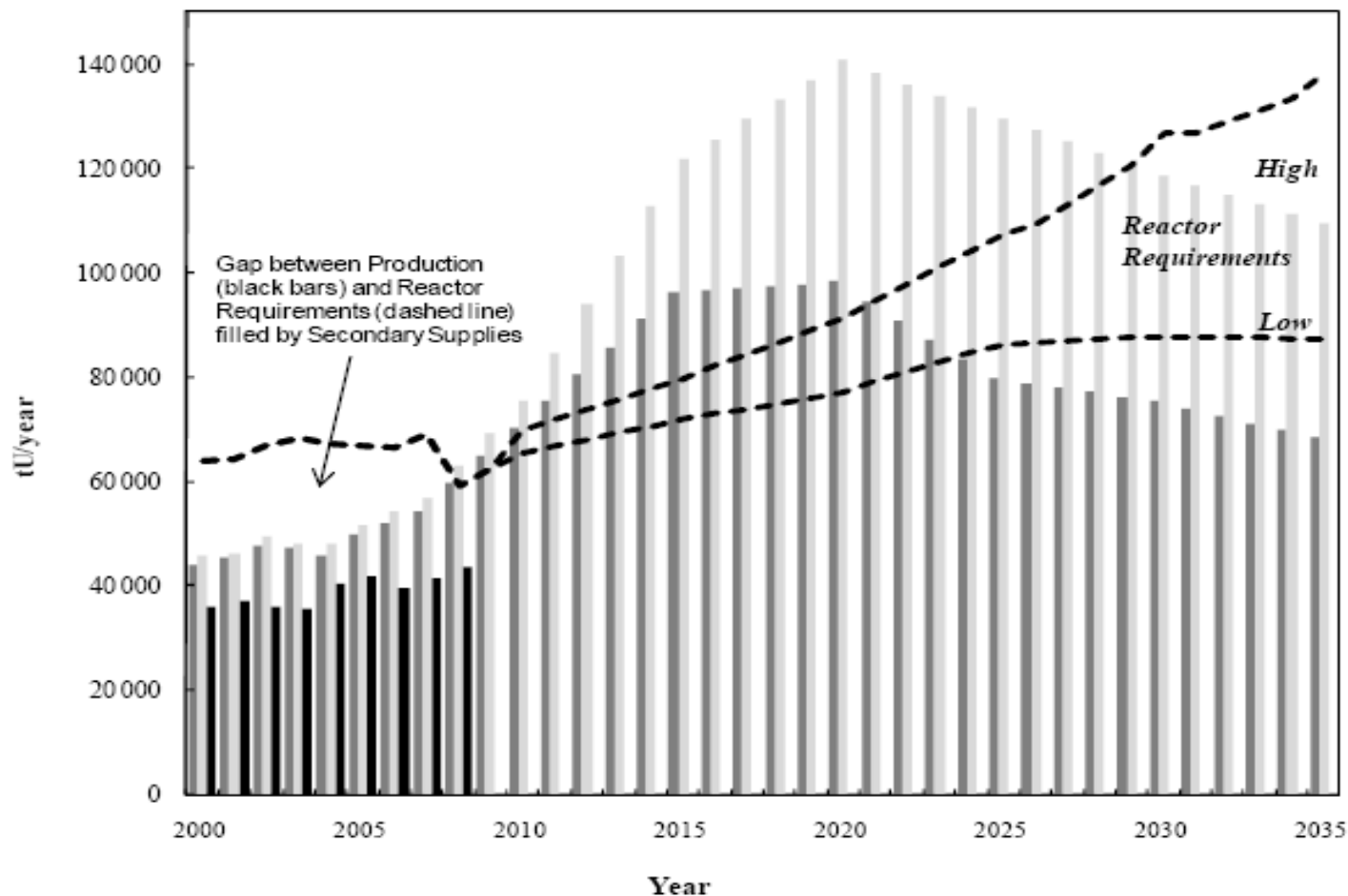
$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\lambda N + q(t)$$

Потребности в природном уране (открытый топливный цикл)
2030 г. - 600ГВт и 2050 г - 1500 ГВт

Uranium demand and annual extraction potential .

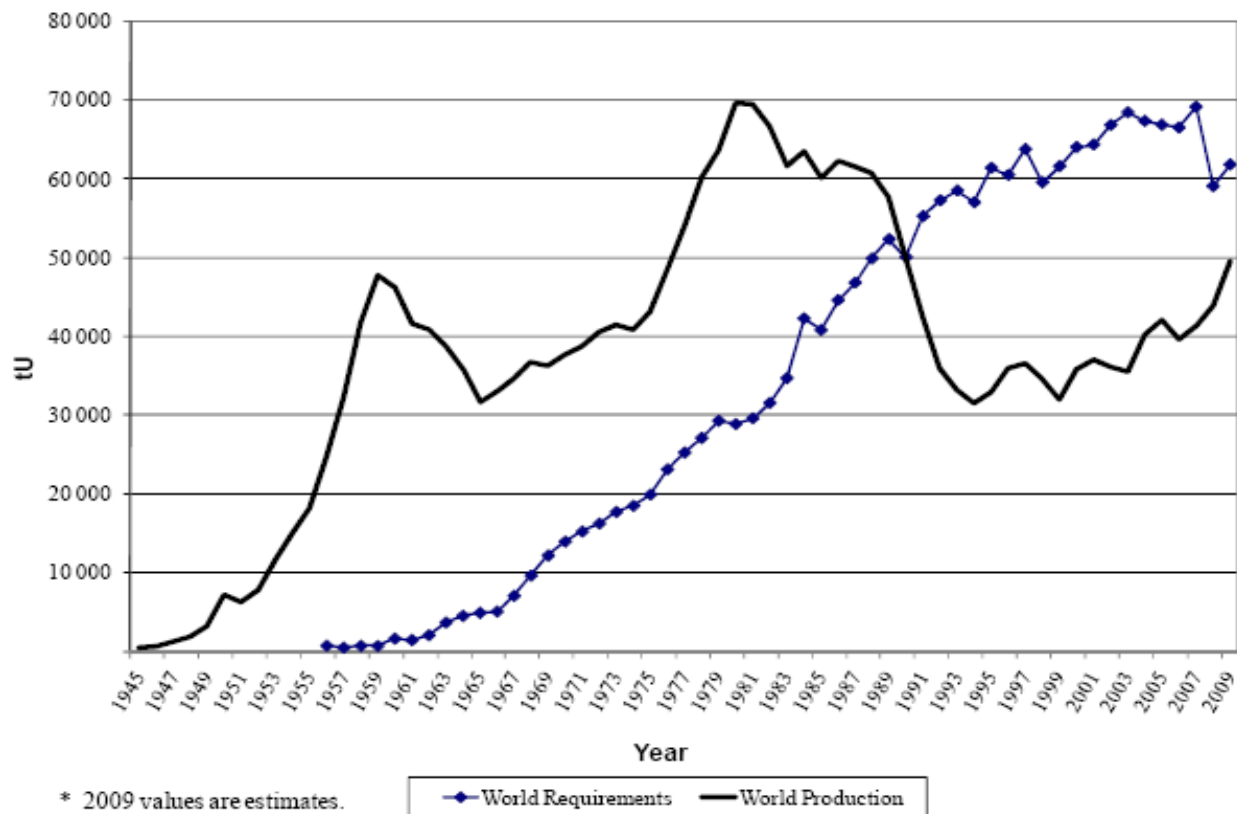


Прогноз годовой добычи урана в мире в сравнении с годовой потребностью в уране



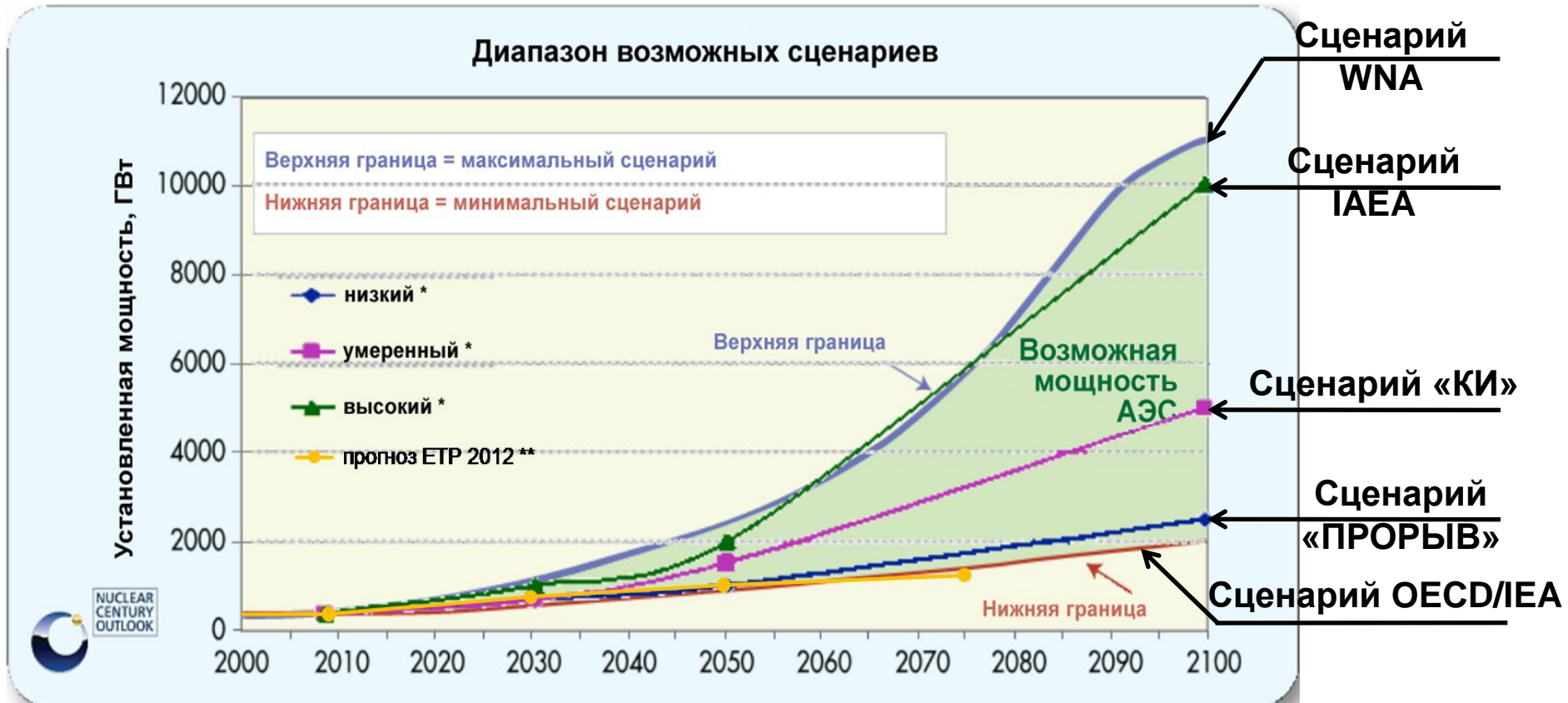
Годовое производство урана и его потребление

Figure 13. Annual uranium production and requirements*
(1945-2009)



Uranium 2009: Resources, Production and Demand, OECD 2010, NEA No 6891
До 2008 года было добыто 2 415 000 т, потреблено 1 840 000 т,
на складах 575 000 т

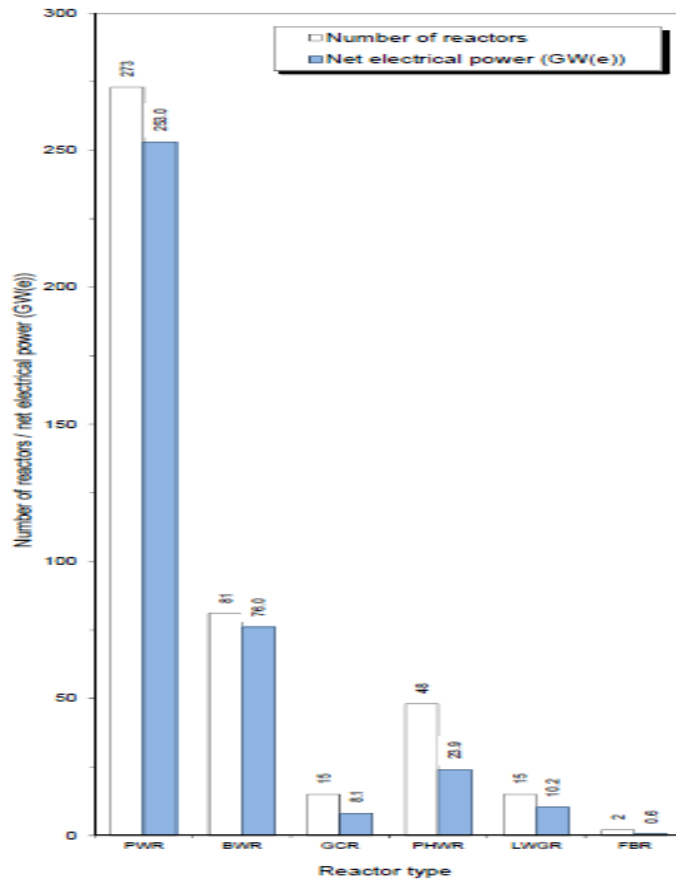
Сценарии развития ЯЭ в мире (WNA - 2008; IAEA - 2010; IAE - 2012)



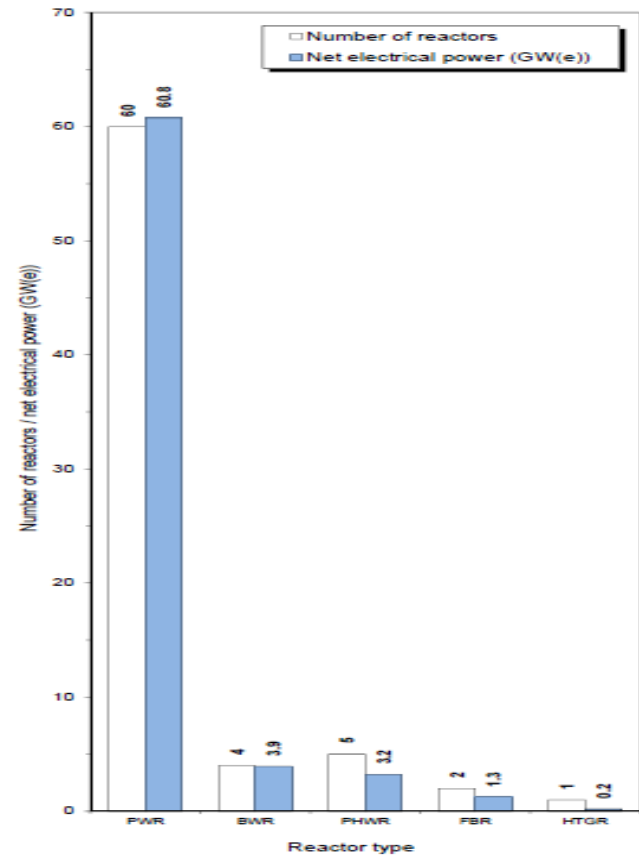
* Nuclear Energy Development in the 21st Century: Global Scenarios and Regional Trends. – Vienna: IAEA, 2010. – (IAEA Nuclear Energy Series № NP-T-1.8)

** Energy Technology Perspectives 2012. Pathways to Clean Energy System. – France: OECD/IEA, 2012

NUCLEAR POWER REACTORS IN THE WORLD
IAEA, VIENNA, 2014
IAEA-RDS-2/34



Number of operational reactors by type and net electrical power (as of 31 Dec. 2013).



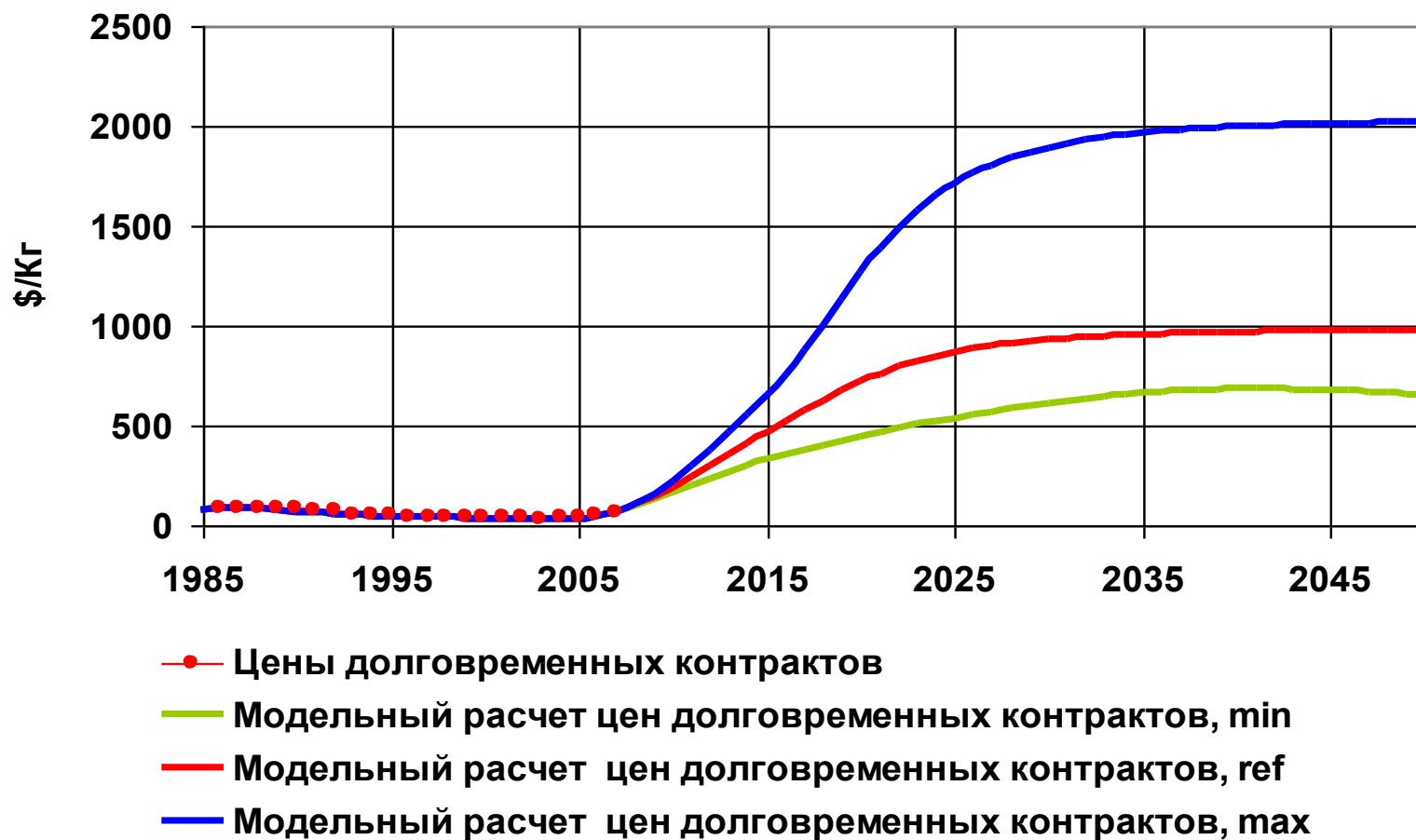
Reactors under construction by type and net electrical power (as of 31 Dec. 2013).

А. П. Александров:

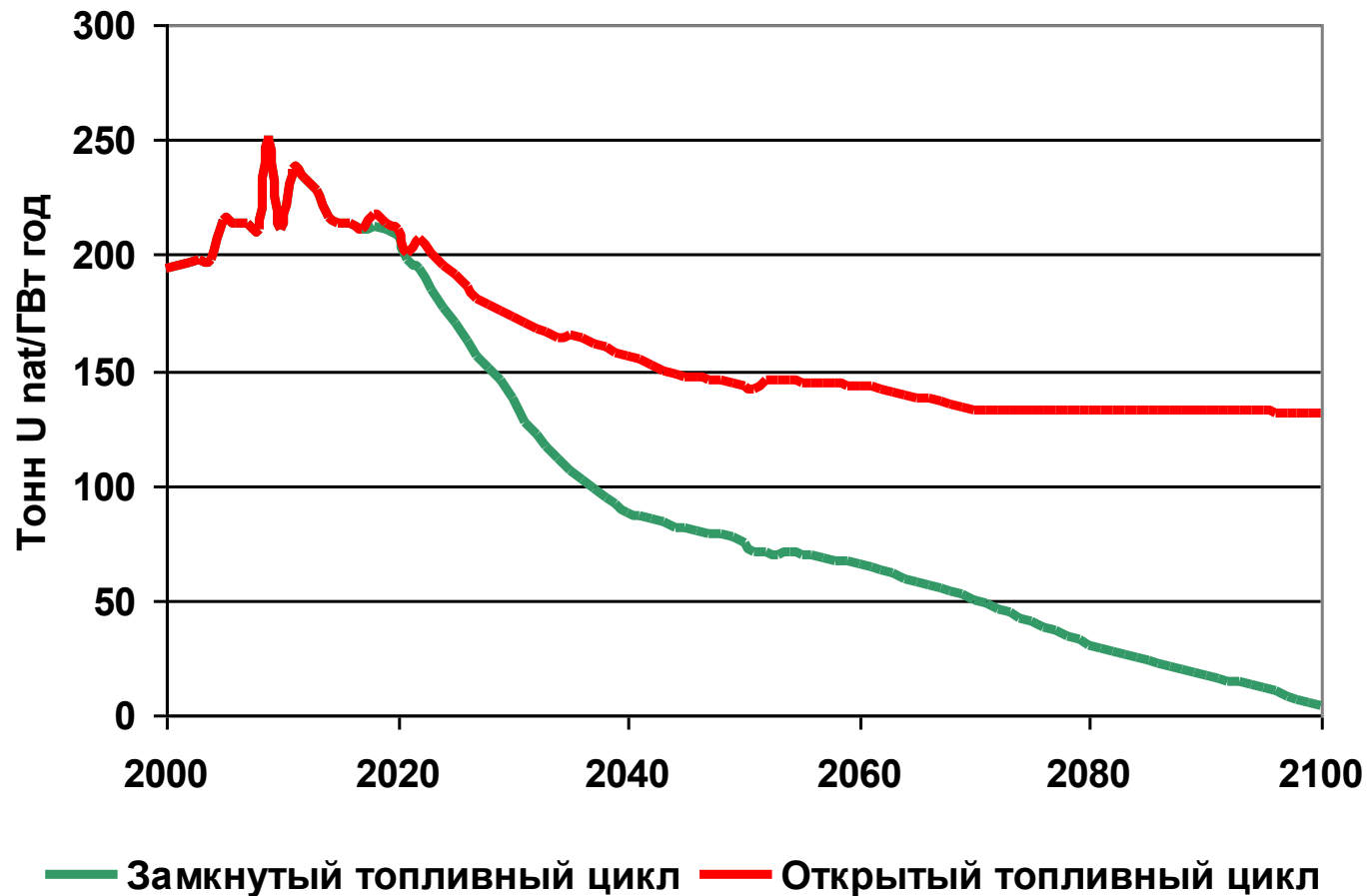
«Накопление плутония в реакторах на тепловых нейтронах имеет первостепенное значение для будущего энергетики, хотя сейчас экономически выгоднее путем глубокого выгорания ядерного горючего достигать более низкого значения стоимости топливной составляющей, что сильно уменьшает выход плутония. Однако этот процесс управляем и может быть приведен к оптимизации соответствующей политикой цен и налогов. Будущая крупная атомная энергетика должна быть способной, в смысле ядерного топлива, к саморазвитию... с подачей в топливный цикл извне только недефицитного U-238...»

«Ядерная энергетика и ее роль в техническом прогрессе» - Генеральный адрес, зачитанный на открытии VII Мирового энергетического конгресса, 1968 г.

Прогноз изменения цен на природный уран



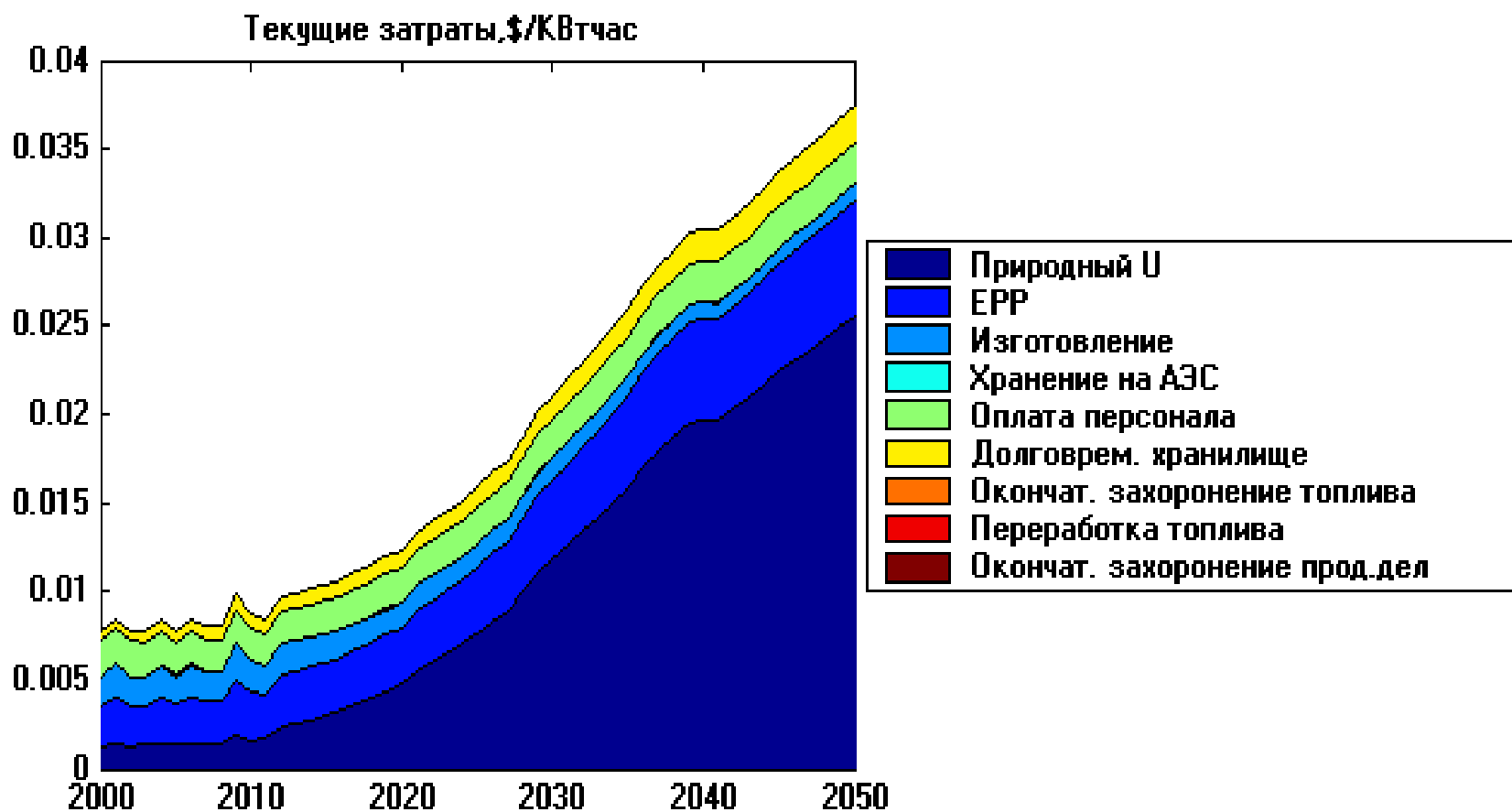
Расход природного урана в системе АЭ России вариант стратегии НИЦ КИ



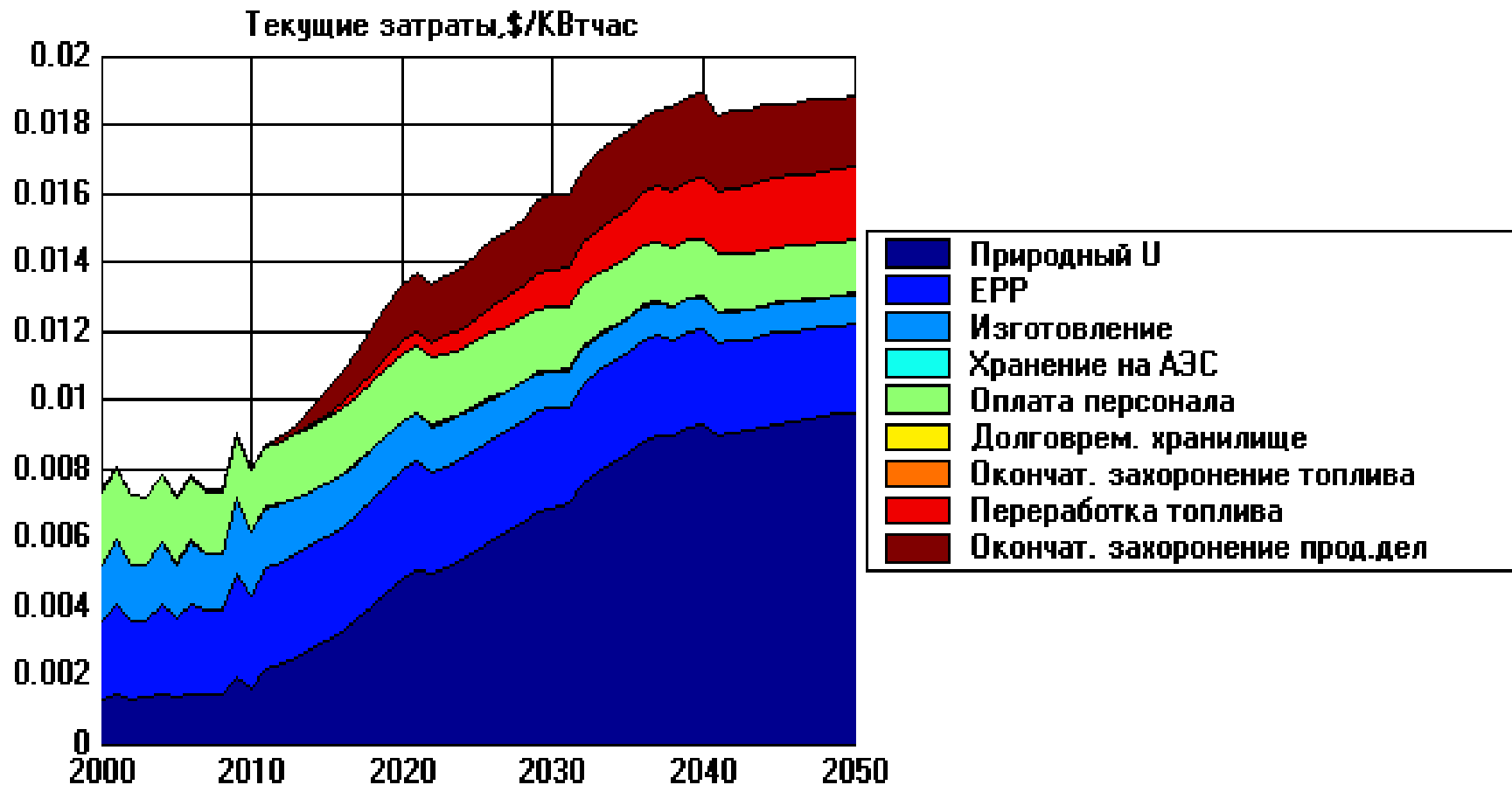
Цели развития эволюционного «СУПЕР-ВВЭР» – ВВЭР-С с модернизацией традиционной технологии ВВЭР

- расход природного урана в открытом топливном цикле
– (130-135) т/ГВт(э)·год;
- максимальное уменьшение количества поглотителей в активной зоне в процессе выгорания, включая борную кислоту;
- возможность работы в замкнутом топливном цикле с КВ ~0,7-0,8.
- Основным методом решения поставленных задач выбран метод регулирования спектра нейтронов в активной зоне ВВЭР в процессе его работы.
- Диапазон изменения водо-уранового отношения при опущенных и извлеченных витеснителях меняется от 1.0 до 1.96.

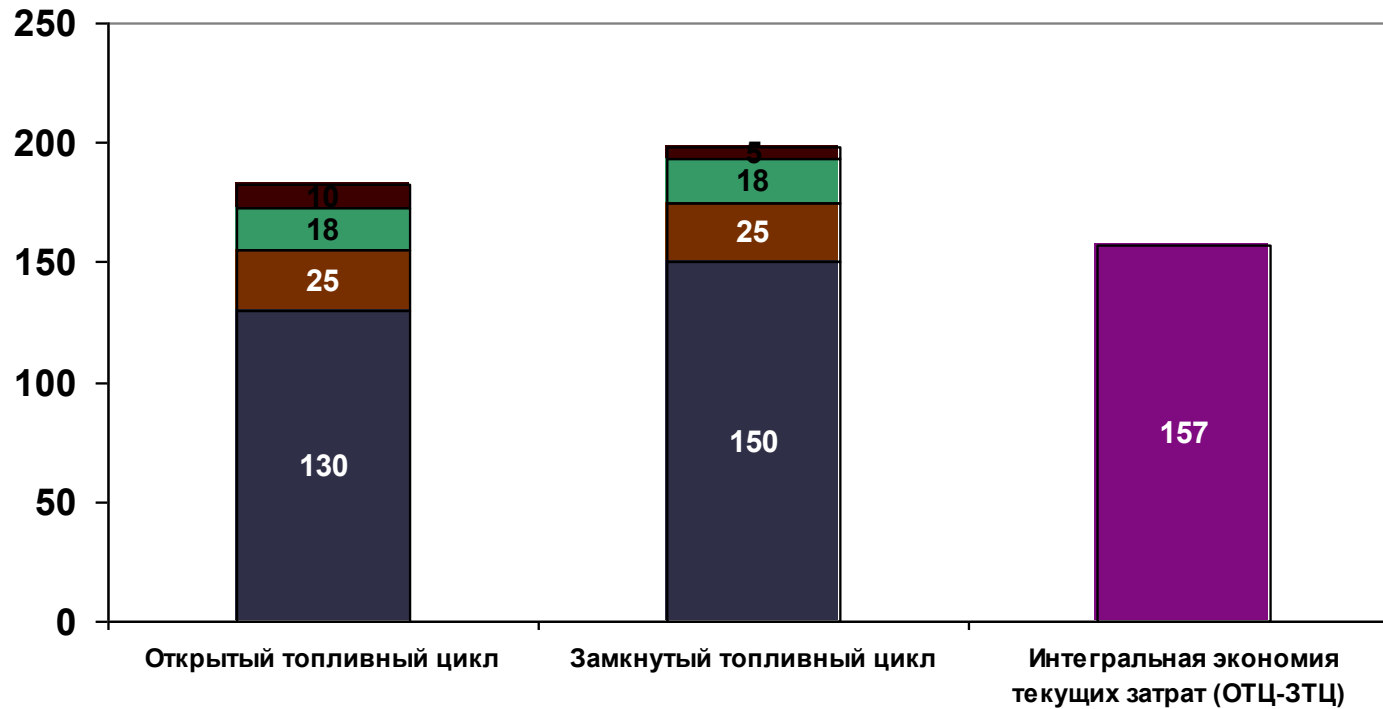
Изменение топливной составляющей для открытого топливного цикла



Изменение топливной составляющей для замкнутого топливного цикла

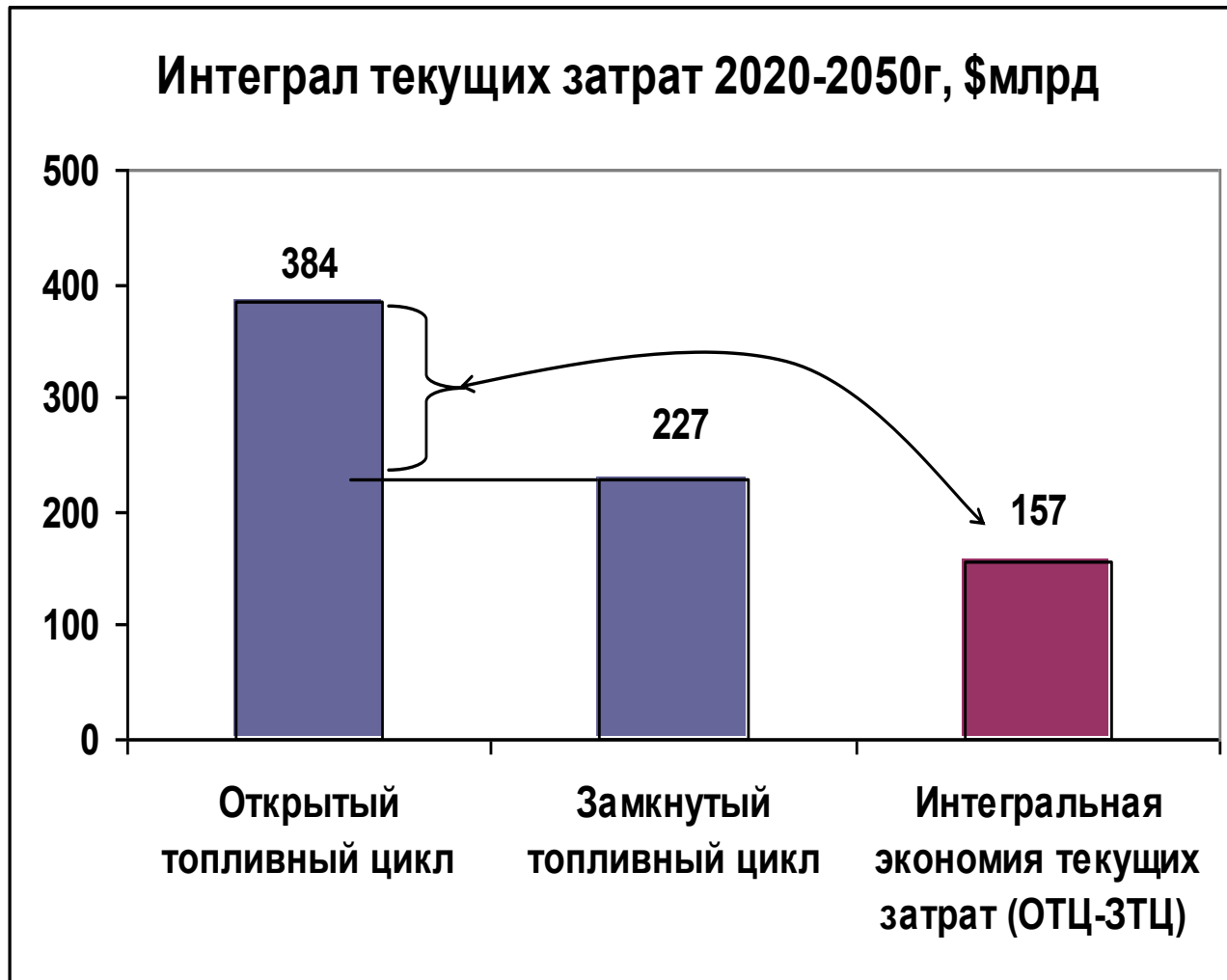


Инвестиции в АЭ (2020-2050гг) и интегральная экономия текущих затрат, \$млрд

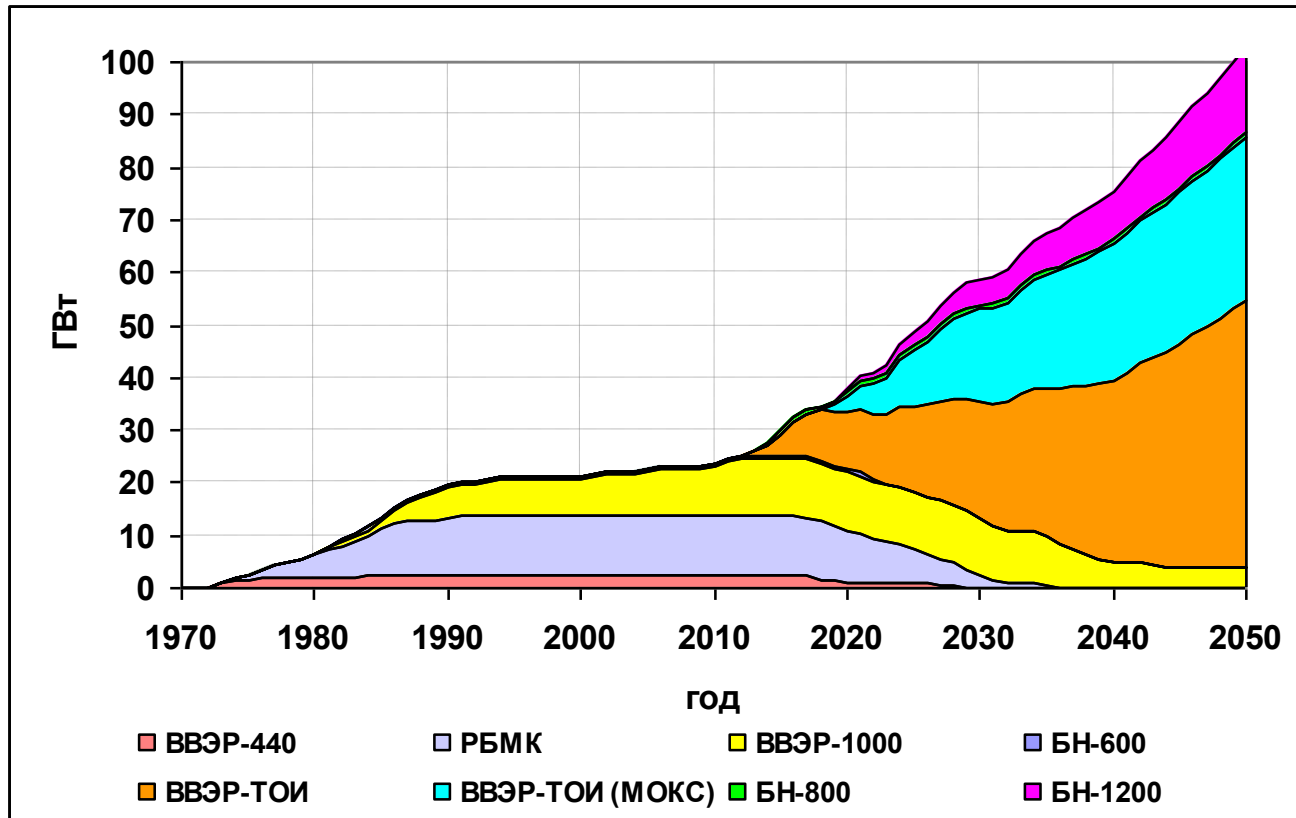


- Развитие сырьевой базы (добыча урана для ОТЦ и Завод по переработке ОЯТ для ЗТЦ)
- Вывод из эксплуатации
- Инвестиции в строительство хранилищ ОЯТ или ПД
- Инвестиции в строительство АЭС

Интеграл текущих затрат в период 2020-2050 гг.
для открытого и замкнутого топливных циклов
и экономия при переходе от ОТЦ к ЗТЦ (300 ГВт эл. на 2050 год)

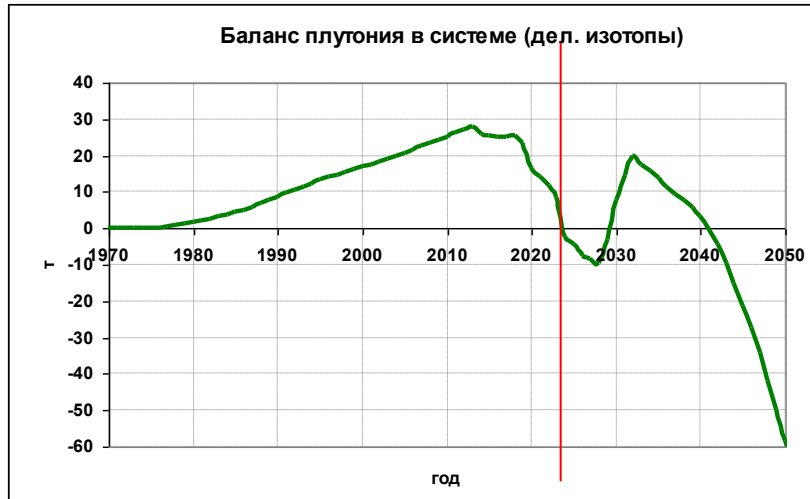


Установленные мощности

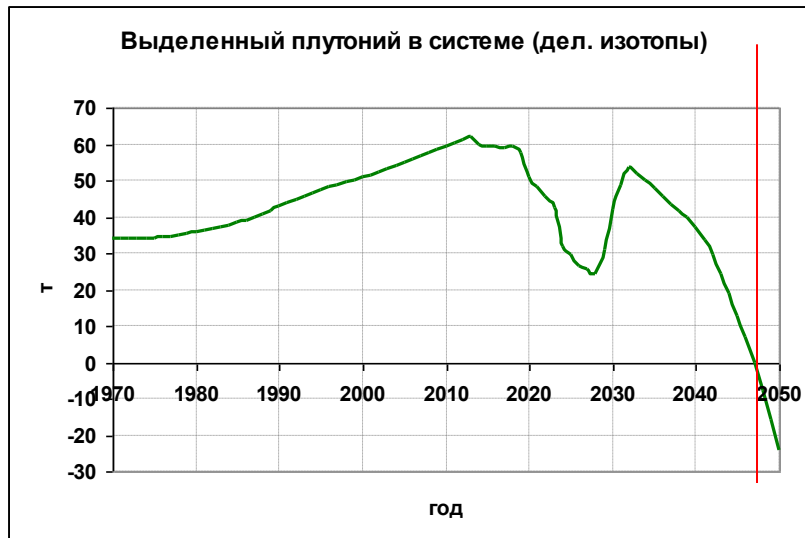


Реактор	ВВЭР-440	РБМК	ВВЭР-1000	БН-600	ВВЭР-ТОИ	ВВЭР-ТОИ (МОКС)	БН-800	БН-1200
Срок службы, лет	45	45	50	40	60	60	45	60

Баланс доступных делящихся изотопов плутония на складе с учетом планируемых вводов заводов по переработке ОЯТ.

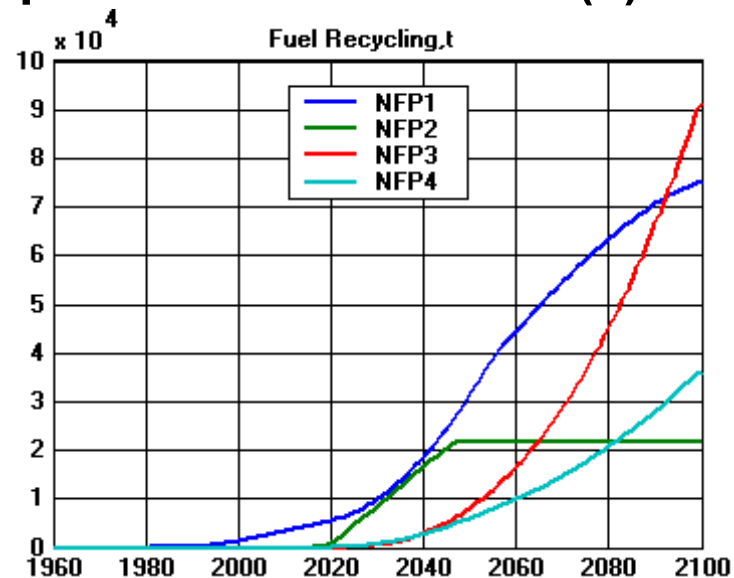
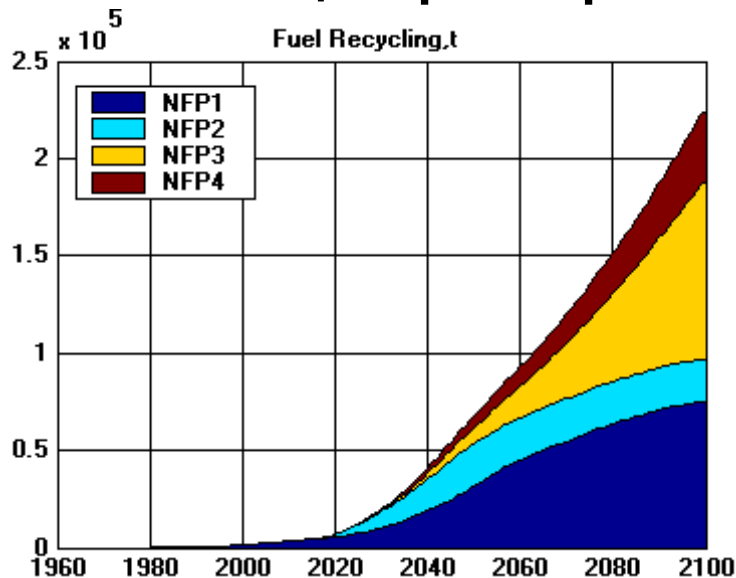


Без учета оружейного Pu
Без оружейного плутония программа имеет дефицит топлива начиная с 2025 года



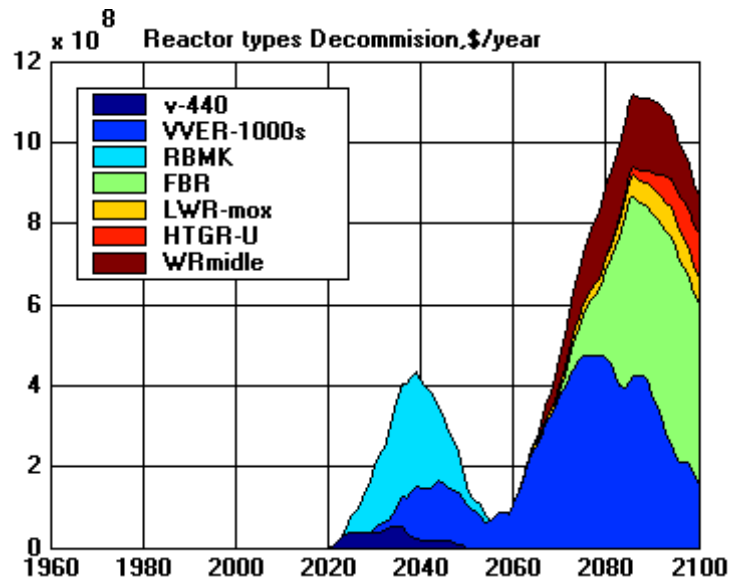
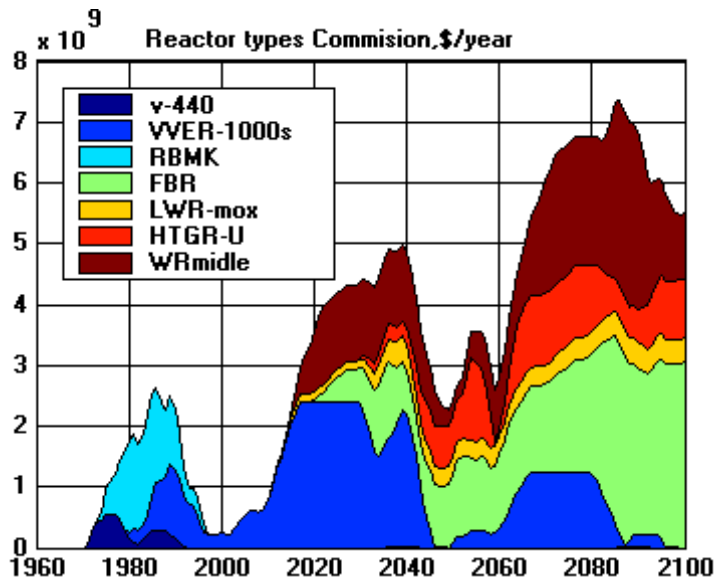
С учетом 34 тонн оружейного Pu дефицит плутония будет после 2045 года, с учетом этого и следует строить программу второго этапа замыкания топливного цикла.

Сценарий гармоничного развития ЯЭ России (2)



Интегральные объемы переработки облученного топлива

NFP1-ВВЭР-1000, ВВЭР-440; NFP2-РБМК; NFP3-FBR, LWR-mox, HTGR-U; NFP4-WRmiddle



Инвестиции в строительство реакторов

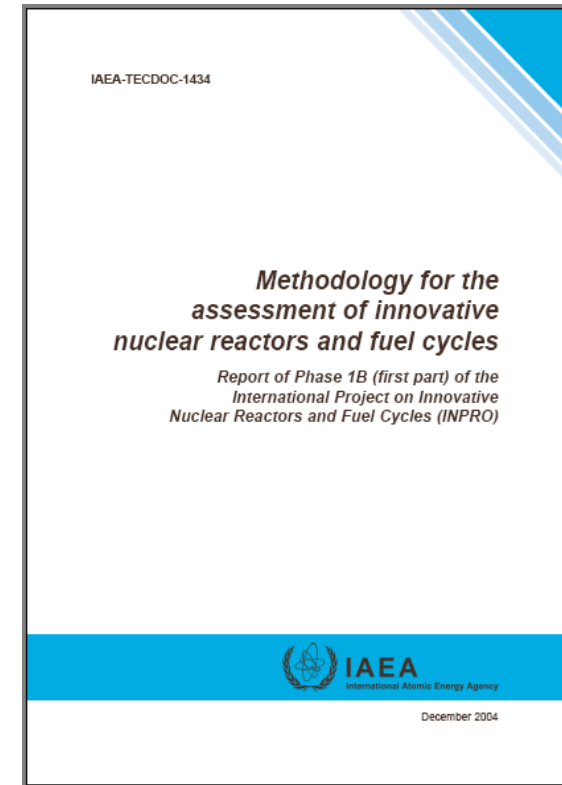
Затраты на вывод из эксплуатации

Методология ИНПРО IAEA-TECDOC-1434

Методология INPRO является инструментом, который может использоваться:

- Для анализа ИЯЭС на предмет ее способности выполнить требования устойчивого развития;
- Для сравнения различных ИЯЭС, чтобы найти предпочтительные или оптимальные ИЯЭС, удовлетворяющие требованиям данного государства;
- Для определения НИР, ОКР, демонстрационных установок, требуемых для совершенствования имеющихся установок и создания недостающих новых компонентов ИЯЭС.

Оценка должна включать все компоненты системы ИЯЭС для того, чтобы получить целостное видение и быть уверенным в том, что система отвечает требованиям устойчивости.



Системные парадоксы

- **...парадокс иерархичности** (решение задачи описания любой данной Системы. возможно лишь при условии решения задачи описания данной С. как элемента более широкой С., а решение последней задачи возможно лишь при условии решения задачи описания данной С. как С.).
Выход из этого и аналогичных парадоксов состоит в использовании метода последовательных приближений, позволяющего путём оперирования неполными и заведомо ограниченными представлениями о С. постепенно добиваться более адекватного знания об исследуемой С.



Отсутствует
вообще

Информация
о системе

Присутствует в
полном
объеме



Малая **Сложность модели системы** Большая

Области эффективного применения моделей систем

Требования пользователя
Базовые принципы
Нормы, правила

Система ЯЭ:

- Предприятия ядерного топливного цикла
- Реакторы на тепловых нейтронах
- Быстрые реакторы
- Реакторы выжигатели
- Термоядерные источники нейтронов

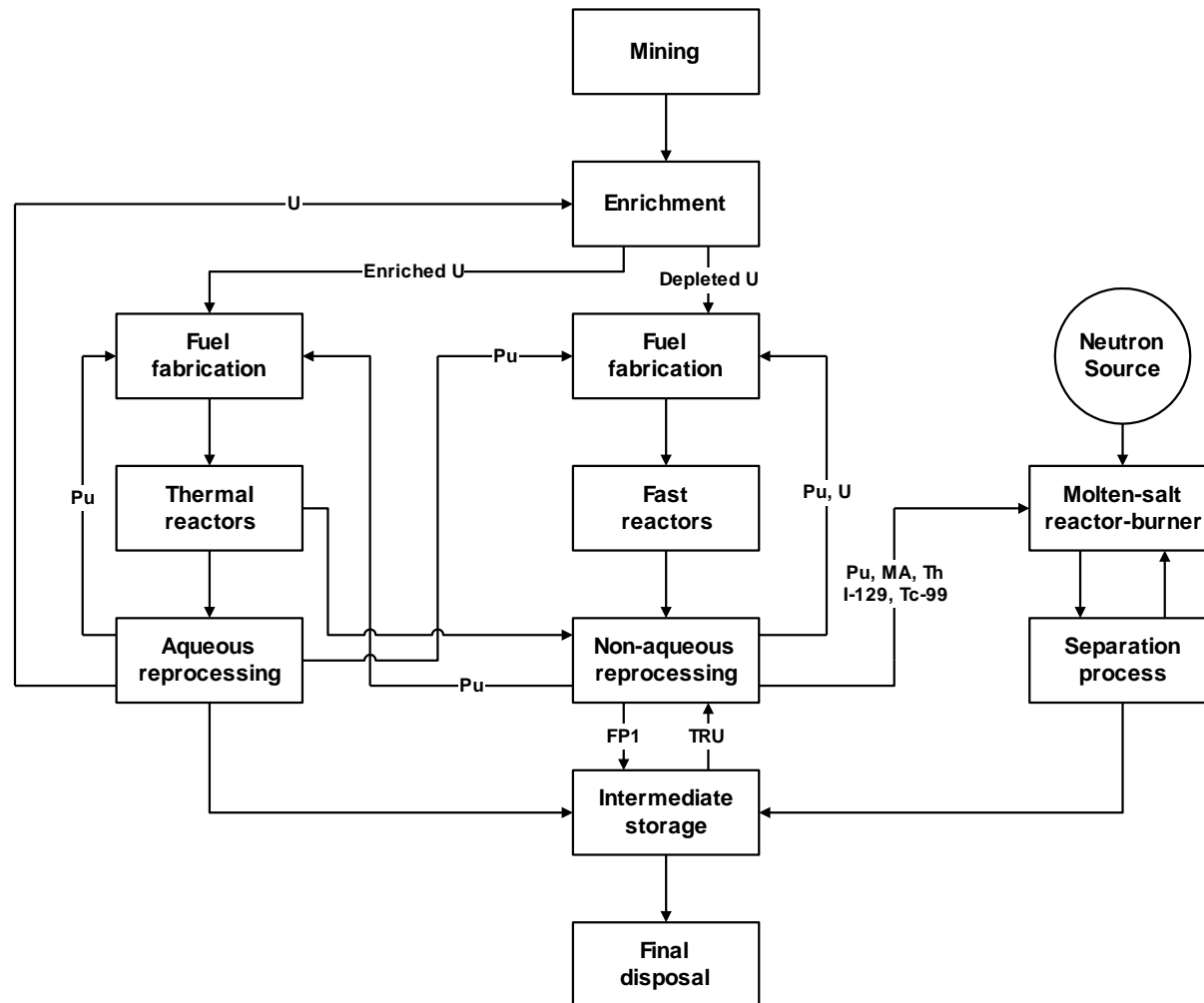
Продукты деления,
Полезные
Радионуклиды,
Энергия

Источники
Энергии:
U-238
Th-232

Источники
Нейтронов:
U-235
D
Li

Неядерные ресурсы

Многокомпонентная система ЯЭ с замыканием ЯТЦ по всем актинидам



Отличие нейтронного баланса в ЯЭУ и ИЯЭС

- Потенциал нейтронного баланса в реакторе при делении делящихся нуклидов (уран-235 и 233, плутоний 239, 241) определяется величиной $(\nu-1-\alpha)$ - дифференциальная характеристика.
- Потенциал нейтронного баланса в системе АЭ при использовании всего урана-238 или тория-232 определяется величиной $(\nu-1-\alpha-1)$ - интегральная характеристика.
- Избыток нейтронов в реакторе позволяет расходовать их для облегчения решения проблем удобства эксплуатации, безопасности и экономической эффективности.
- При решении проблемы воспроизводства ядерного горючего задача реализации нужного нейтронного баланса в системе сильно усложняется - становятся не эффективными все те меры (поглощение в специальных поглотителях, блокирование взаимодействия нейтронов с ураном-238 и торием-232), которые были приемлемы для получения энергии из беспорогово делящихся нуклидов. Значительно повышается роль «внешних» источников нейтронов (электроядерные, термоядерные)

Ресурсы нуклидной экономики

Состав выгоревшего топлива

(стандартный PWR, выгорание 33ГВт сут/т, 10 лет выдержки)

1 тонна ОЯТ:

955 кг - U

8,5 кг - Pu

МА:

0,5 кг - Np

0,6 кг - Am

0,02 кг - Cm

Долгоживущие ПД:

0,2 кг – 129I

0,8 кг – 99Tc

0,7 кг – 93Zr

0,3 кг – 135Cs

Короткоживущие ПД:

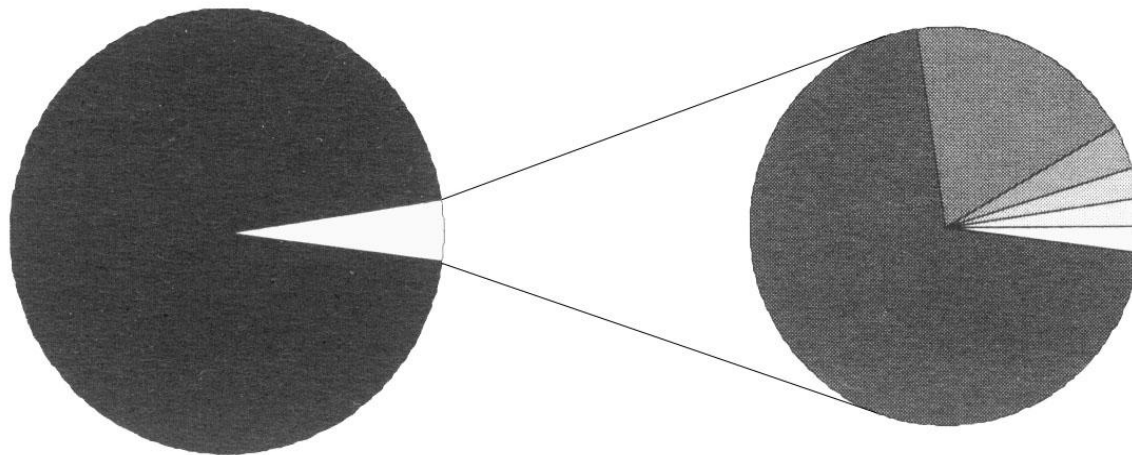
1 кг – 137Cs

0,7 кг – 90Sr

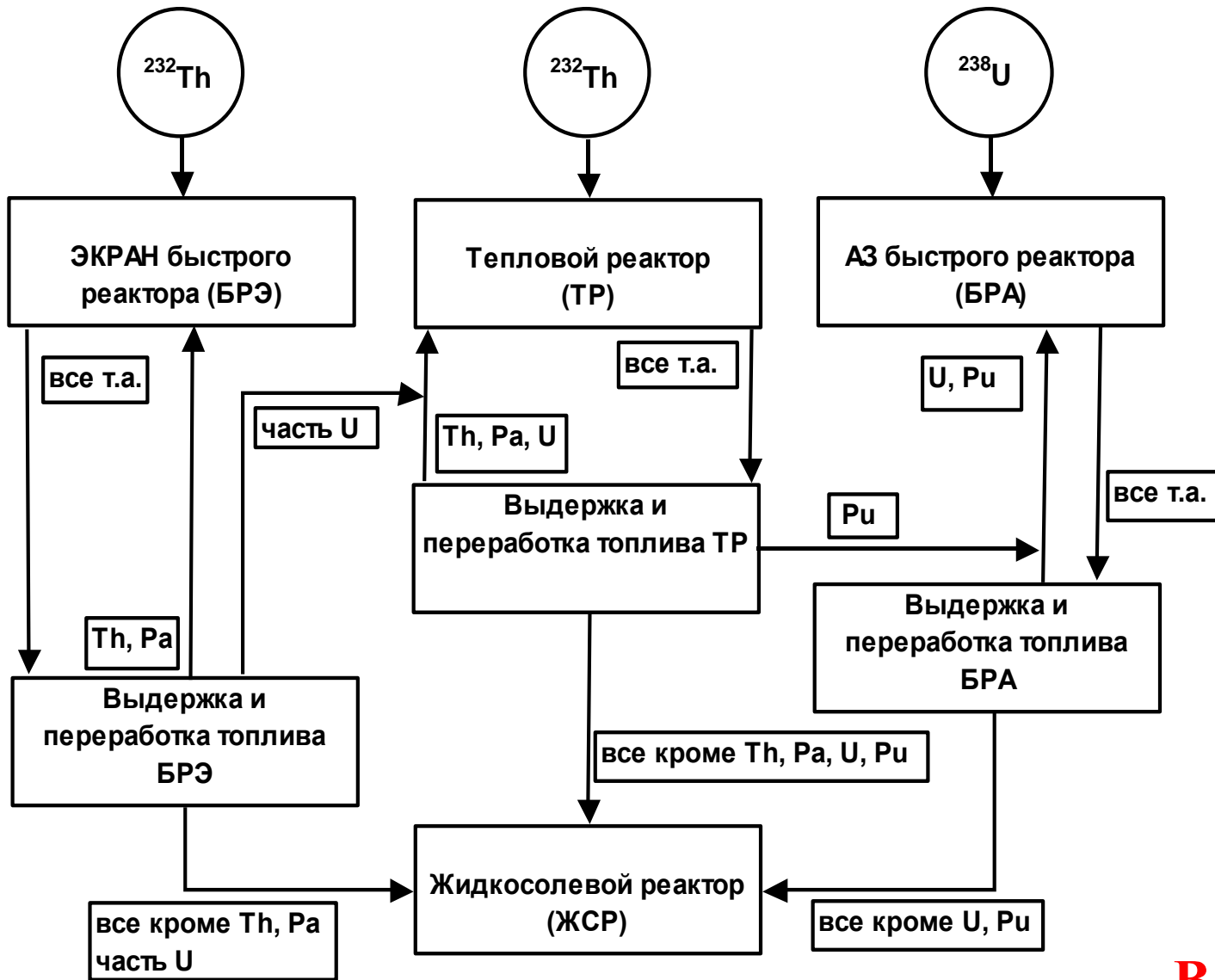
Стабильные ПД

10,1 кг – лантаниды

21,8 кг - другие



■ Uranium	(95.5 %)
■ Stable fission products	(3.2 %)
■ Plutonium	(0.8 %)
■ Short-lived Cs and Sr	(0.2 %)
■ Minor Actinides	(0.1 %)
□ Long-lived I and Tc	(0.1 %)
□ Other long-lived fission products	(0.1 %)



88% ТР

9% БР

3% ЖСР

На 1ГВт(э)

Всего

136.2 т т.н.

В переработке

87.8 т т.н.

Уран-плутоний-ториевая структура

Поколения ЯТЦ

- 1 Природный уран (открытый ЯТЦ, CANDU, реакторы наработчики)
- 2. Обогащенный уран (открытый ЯТЦ, реакторы PWR, BWR, ВВЭР)
- 3. Переработка ОЯТ и возврат урана в ЯТЦ (замыкание ЯТЦ по урану 235, РБМК, PWR)
- 4. Переработка ОЯТ и возврат урана и плутония в ЯТЦ (замыкание ЯТЦ по урану 235 и плутонию, PWR, реакторы на быстрых нейтронах, решение проблем топливоиспользования)
- 5. Переработка ОЯТ, эффективное использование актинидов (управление потоками нуклидов в системе АЭ, многокомпонентная система АЭ, внешние источники нейтронов, решение проблем расширения топливной базы ЯЭ и проблем нераспространения, захоронения РАО, устойчивого развития)

Крупнейшие международные мегапроекты

	МКС	БАК	ИТЭР
Миссия	Освоение ближнего космоса	Фундаментальные исследования строения материи	Исследования и разработки нового источника энергии
Страны-участники	<u>Россия, США,</u> Европа, Япония, Канада, Бразилия	<u>Европа,</u> США, Япония, Россия	<u>Европа,</u> Япония, Россия, США, Китай, Ю. Корея, Индия
Сроки проекта	1993-1995 –эск. проект 1998-запуск 1 ^{ого} модуля 2015-2020 -завершение	1994-2000 –проект 2000-2008- сооружение	Проект: 1988-2005 Сооружение: 2006-2018 Эксплуатация: 2018-2030
Стоимость	≥40 млрд.\$	~8 млрд.\$	Проект: 2 млрд.\$ Сооружение: ≥ 5 млрд.€ Эксплуатация: ~5 млрд.€
Способы поставок оборудования	Готовые замкнутые модули и системы	Готовые замкнутые модули и системы	Готовые замкнутые системы, подсистемы, совместное изготовление
Способ управления	Согласование программ, совместные программы	Единое руководство	Международная организация

Экономическая специфика АЭ

- В области АЭ даже в условиях либеральной экономики можно делать только то, что разрешено законом, в отличие от других технологий, которым позволено все то, что не запрещено законом.
- В АЭ затруднен расчет эффективности, поскольку на момент получения прибыли сделаны не все затраты, связанные с внешним топливным циклом (хранение ОЯТ, транспортировка, переработка ОЯТ, захоронение отходов, вывод из эксплуатации).
- Времена задержки производства необходимых затрат не приемлемы для современного либерального экономического механизма – слишком велик риск финансовых потерь за это время, непривычно велики как кредитные, так и юридические риски.
- Минимизация рисков доступна лишь крупным организациям (международным корпорациям?), способным к стратегическому планированию на длительные сроки.

Постулат:

- Экономическая эффективность различных отраслей связана с установлением соответствующих «правил», так, например, трудно представить эффективный автотранспорт без правил дорожного движения.
- единой окончательной модели, предназначенной для разработки законодательства в области ядерной энергии или для определения того, какая институциональная база наилучшим образом может обеспечить осуществление национального ядерного законодательства, не существует.

Особенность АЭ в либеральной экономике: вместо принципа «можно все, что не запрещено» используется принцип «можно только то, что разрешено»

Заключение

- Для того чтобы АЭ могла решить поставленные перед ней в рамках международного проекта ИНПРО задачи по участию в обеспечении устойчивого развития она должна перейти на использование урана 238 и тория 232.
- **Эффективное использование урана 238 и тория 232 требует выведения продуктов деления из нейтронного поля.** Это как бы внутренне присуще жидкотопливным реакторам, но в твердотвельных реакторах это связано с организацией внешнего топливного цикла. Чем меньше продуктов деления будет в нейтронном поле, тем эффективнее можно использовать ядерное топливо.
- Замыкание ЯТЦ по МА незначительно повышает нейтронный потенциал системы АЭ, но существенно может помочь в решении проблем захоронения РАО, особенно если еще долго не будет принято политическое (юридическое) решение касательно того что (по каким нуклидам необходимо замыкание ЯТЦ), в каком количестве (глубина выгорания, уровень потерь), как и где можно захоранивать (помещать в конечное состояние, не требующее дальнейшего контроля).

Заключение

- Совершенствование моделей ЯЭУ и предприятий ЯТЦ по отдельности необходимо, но это не избавляет нас от взаимных обвинений, выдвижения встречных требований и конкурентных отношений, снижающих эффективность всей системы.
- *Необходима разработка моделей отражающих специфику работы системы АЭ с учетом ее жизненного цикла (в которой нейтронный баланс считается по всему жизненному циклу с учетом необходимости управления и контроля количествами и потоками нуклидов между всеми ЯЭУ и установками ЯТЦ).*
- *Экономика всей системы АЭ будет определяться не только себестоимостью производства энергии и инвестициями, необходимыми для ее развития, но в значительной степени будет зависеть от финансовых рисков (управления, рыночных, кредитных, юридических), т.е. от стоимости денег (а это в свою очередь в значительной степени связано *длительность производственного цикла получения энергии, но не из урана 235 и плутония, а из урана 238 и тория 232*)*

Спасибо за внимание!



Subbotin_SA@nrcki.ru

Введение в ЯЭ

- В основе ЯЭ лежит возможность создания нейтронного поля и управления им и контроль взаимодействия нейтронов с различными нуклидами и материалами.
- «Царство существ, населяющих атом, - это необычайный и в то же время реальный мир. Многие здесь еще остаются неизученным и, возможно, никогда не будет познано до конца, хотя темп исследований нарастает с каждым днем.» - Дональд Дж.Юз «История нейтрона» Атомиздат, 1964

Основные научно-технические глобальные проблемы развития ЯЭ, решаемые при замыкании ЯТЦ

- Повышение эффективности использования урана-235 в качестве источника нейтронов;
- Вовлечение урана-238 и тория- 232 в энергопроизводство;
- Обращение с радиоактивными отходами и облученным ядерным топливом.

Некоторые граничные условия постановки задачи

- ядерная энергетика единственный существующий масштабный энергетический резерв
- репродуцирование современной структуры АЭ не решает энергетических проблем. Необходимо организовать полномасштабный топливный цикл, чтобы задействовать энергетический ресурс урана -238
- нельзя выделить какое-либо одно из направлений развития ядерных технологий, которое решило бы все задачи, стоящие перед ЯЭ.
- мы не знаем совокупности всех условий и требований, которые возникнут в будущем и будут определять выбор структуры ЯЭ и отбор ЯЭУ, и выбор этот предстоит делать не нам.
- существующие, разрабатываемые и предлагаемые реакторные направления не обладают ни в отдельности, ни в их совокупности необходимым и достаточным для осуществления убедительного выбора набором характеристик, физических и математических моделей, экспериментальной и технологической базами. .

Баланс нейтронов в различных реакторах, кг/ГВт эл. год

Кг/ ГВт год	ТР	БР с экр.	БР без экр.
Генерация нейтронов	12,6	12,2	12,2
Захват в уране 238, аз/экран	3,18	3,75/1,82	3,52
Деление на уране 238, аз/экран	0,33	0,62/0,42	0,67
Деление на актинидах, кроме урана-238	4,72	3,16	3,53
трансмутация актинидов, кроме урана-238	2,35	1,11	0,96
поглощение в продуктах деления	0,84	0,50	0,46
В-10	0,36		
поглощение в к.м. и т.н.	0,60	0,34	0,30
Утечка в отражатель	0,09	0,47	2,73

Задачи, которые решает проект ИНПРО:

- организация форума, на котором эксперты и политики из развитых и развивающихся стран могут обсуждать технические, экономические, экологические, связанные с нераспространением и социальные аспекты ядерно-энергетического планирования, а также разработки и развертывания инновационных ядерно-энергетических систем (ИЯС) в 21 веке;
- **разработка методологии для оценки ИЯС и установление ее в форме набора рекомендаций МАГАТЭ для подобных оценок;**
- анализ роли и структуры ИЯС на глобальном, региональном и национальном уровнях для устойчивого удовлетворения энергетических потребностей;
- упрощение координации международного сотрудничества в области развития и развертывания ИЯС;
- **обеспечение особого внимания потребностям развивающихся стран, заинтересованных в ИЯС.**

Базовые группы «требований» «Международного проекта по инновационным реакторам и ядерным топливным циклам - ИНПРО»:

- Устойчивость (ресурсообеспеченность, окружающая среда).
- Экономика.
- Отходы.
- Безопасность.
- Окружающая среда.
- Нераспространение.
- Инфраструктура.

Рекомендация ИНПРО

- Для развития и развертывания инновационных энергетических систем требуются инвестиции, и инвестор, будь то представитель промышленности или правительства, должен быть уверен, что его выбор вложения капитала разумен. Альтернативой такому капиталовложению могут стать другие источники энергии, стремящиеся привлечь капиталовложения для разработки и развёртывания, либо неэнергетические технологии. Поэтому, **чтобы развитие и развёртывание инновационных ядерных энергетических систем осуществилось, они должны успешно бороться за инвестиции.**
- На различных рынках и в различных регионах, в различные моменты времени и на различных этапах развития и развёртывания систем, источники инвестирования могут различаться, и можно допустить наличие различных факторов, которые в большей или меньшей мере определяют привлекательность инвестиций. Но в любом случае, **должно быть выполнено серьёзное экономическое обоснование проекта.**

Базовые физические принципы устойчивого развития ЯЭ, удовлетворение которым требует замыкания ЯТЦ

- Риск пропорционален мощности ЯЭ, а не интегральной энерговыработке (замыкание ЯТЦ по всем опасным радионуклидам);
- **Нейтронная эффективность ЯЭ должна возрастать (бридинг и внешние источники нейтронов);**
- Минимизация времени жизни (количества) опасных радионуклидов в системе (разные типы реакторов в системе ЯЭ);
- Эффективное использование радионуклидов, включая использование всего добываемого топлива (замыкание ЯТЦ по актинидам);

- Как эффективность, так и безопасность и приемлемость АЭС определяются не только характеристиками и качеством эксплуатации самой АС, но и характеристиками и качеством работы предприятий ядерного топливного цикла.
- Одним из путей создания благоприятного климата для привлечения инвесторов является замыкание ЯТЦ и создание ресурсообеспеченной системы АЭ. Вопросы ресурсообеспеченности включают в себя как эволюционные технологии модернизации существующих установок с целью сокращения потребления природного урана, так и разработку инновационных проектов (быстрых реакторов) по вовлечению в цикл получения энергии изотопа U-238 для расширения ресурсной базы АЭ.
- Ресурсообеспеченность является необходимым, но не достаточным условием привлечения инвестиций в АЭ, которое позволит сохранить низкий уровень топливной составляющей и ее стабильность во времени, что является одним из преимуществ АЭ по сравнению с углеводородной энергетикой.
- Основная задача при эксплуатации АЭС сводится к поиску компромиссов между повышением текущей эффективности работы АЭС в условиях довольно быстрых изменений экономической и политической обстановки и решением проблем обеспечения безопасности и экологической приемлемости обращения с ОЯТ и РАО в условиях ужесточения требований долговременной приемлемости ядерной энергетики.

Интегральный баланс нейтронов

10 Млн. т природного урана (15 000 Млрд. т.н.э.)

- 72 000 т урана 235 (110 Млрд. т.н.э.)
 - 766 т нейтронов деления
 - 180 т «свободных нейтронов»
- 9 927 450 т урана 238
 - 120 000 т нейтронов деления
 - 12 500 т «свободных нейтронов»

Реактор 1000 МВт эл. (киум=0,8):

950 кг в год продуктов деления;

10,1 кг нейтронов деления в год;

1,4 кг в год «свободных нейтронов»;

Скорость генерации нейтронов - $3,0 \cdot 10^{20}$ н/сек; (44,8 А)

Равновесное количество нейтронов в реакторе $4,9 \cdot 10^{-12}$ кг

Баланс делящихся нуклидов, кг/ГВт эл.год

Кг/ ГВт год	ТР	БР с экр.	БР без экр.
Деление урана 238	80	250	160
Генерация плутония	760	1330	840
Деление урана 235	740		
Деление плутония	370	760	840
КВ	0,50	1,70	1

Темпы вовлечения ресурсов в систему АЭ

Время жизни нуклидов в реакторе / в системе АЭ
(время снижения количества в e раз), лет

	Th-232	U-233	U-235	U-238	Pu-239
• ТР	120/360	7/22	7,5/23	370/1100	2,7/8,2
• БР	82/160	10/21	13/39	100/200	14/28
• ЖСР	1,3	0,34	0,4	0,7	0,4
• ТР+БР+ЖСР	240	21	19	536	17

Статья 22. Государственный учет и контроль ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов

- Ядерные материалы, радиоактивные вещества, радиоактивные отходы независимо от формы собственности подлежат государственному учету и контролю в системе государственного учета и контроля ядерных материалов и в системе государственного учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов для определения наличного количества этих материалов, веществ и отходов в местах их нахождения, предотвращения потерь, несанкционированного использования и хищений, предоставления органам государственной власти, органам управления использованием атомной энергии и органам государственного регулирования безопасности информации о наличии и перемещении ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов, а также об их экспорте и импорте.
- Порядок организации системы государственного учета и контроля ядерных материалов и системы государственного учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов, а также органы, осуществляющие государственный учет и контроль ядерных материалов и государственный учет и контроль радиоактивных веществ и радиоактивных отходов, определяются Правительством Российской Федерации.



Источник неприятностей как энергетических, экономических, так и прочих?

- «Дело в том, что все наши модели, как бы сложны они не были, слишком просты» А.Гринспен

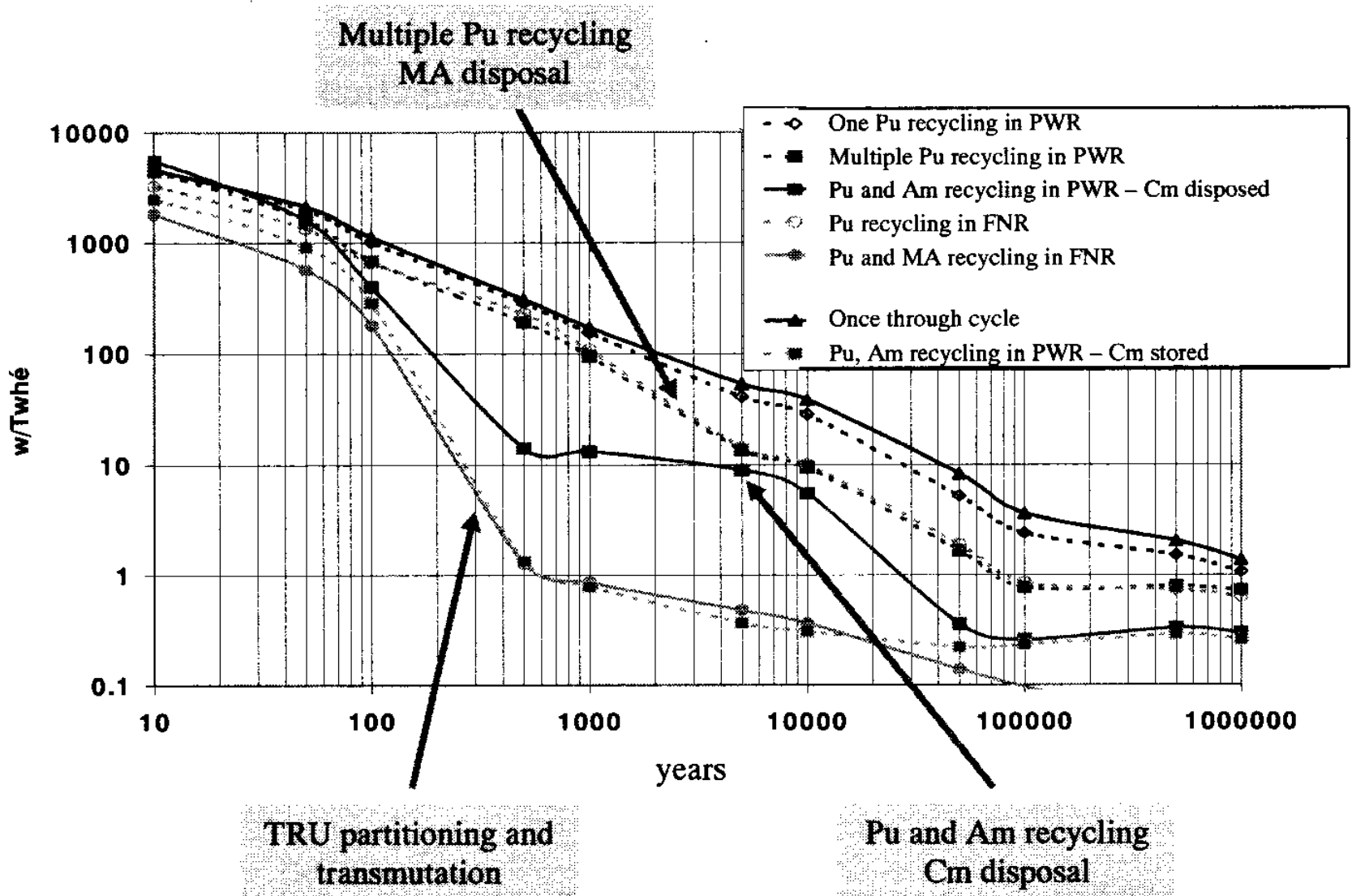
Изменение экономической ситуации

- В новой ситуации, когда рынок «воспринимает» себестоимость электроэнергии на уровне 6-8 цент/кВт час, условия для АЭ меняются кардинально.
- В прежние годы АЭ была «зажата» ценовым фактором и единственный путь ее конкурентоспособности был связан с минимизацией удельных капитальных затрат за счет увеличения единичной мощности энергоблока, снижения эксплуатационных издержек, увеличения глубины выгорания топлива и КИУМ.
- Сейчас появляется возможность оптимизировать единичную мощность АЭС, глубину выгорания топлива и его энергонапряженность, использовать режимы маневрирования мощностью, оставаясь в границах конкурентоспособности, это меняет и расширяет конкурентное поле, появляются возможности более полно приспособливаться к различным потребностям рынка.

- Основные этапы и направления развития атомной энергетики:
 - наращивание мощностей на основе совершенствуемых ВВЭР;
 - ввод БР с расширенным воспроизводством топлива и замкнутого топливного цикла;
 - внедрение АЭ в производство водорода, в энергоемкие отрасли промышленности и в коммунальный сектор.
- Предлагаемый вариант стратегии развития атомной энергетики России на период до 2050 года обладает адаптационными способностями к изменяющимся условиям и может служить основой для выбора стратегических направлений развития отрасли.
- Для снижения управленческих, рыночных, финансовых, юридических рисков развития АЭ необходимо не только создать ядерный топливный цикл как системообразующий базис, но и обеспечить инфраструктурные условия развития АЭ в области машиностроения, строительства, правовой базы, общественной приемлемости, инвестиционной привлекательности.

Проблемы захоронения ОЯТ и РАО

(мощность энергоснабжения в захоронении)



Базовые физические принципы устойчивого развития ЯЭ

- Риск пропорционален мощности ЯЭ, а не интегральной энерговыработке (замыкание ЯТЦ по всем опасным радионуклидам);
- **Нейтронная эффективность ЯЭ должна возрастать (бридинг и внешние источники нейтронов);**
- Минимизация времени жизни (количества) опасных радионуклидов в системе (разные типы реакторов в системе ЯЭ);
- Эффективное использование радионуклидов, включая использование всего добываемого топлива (замыкание ЯТЦ по актинидам);

Фредерик Содди об АЭ

- 1904 года: «искусственная трансмутация элементов навсегда освободит человечество от проблемы энергии...»
- 1907 год: «открытый нами недавно внутренний запас энергии в атомах ставит нас в то же положение, в котором первобытный человек находился по отношению к стихийной силе огня»
- 1911 год: «Пока все победы науки над природой смахивают на успехи школьника. Но этот период уже проходит... **Экономия и бережливость неизбежно сменят идею развития и прогресса... Рано или поздно...на Земле для пополнения естественного расходования энергии не останется ничего, кроме первоначальных запасов атомной энергии...**»

Этап перехода к ЗЯТЦ в ядерной энергетике России

- При работе в открытом топливном цикле блоки ВВЭР, которые будут построены в России и за рубежом к 2030 году, **за 60 лет службы израсходуют** основные разведанные запасы дешевого урана в России (~550 000 т).
- Центральная стратегическая задача ядерной энергетики России – создание замкнутого топливного цикла с максимальным использованием сырьевого потенциала **урана-238 и тория-232** на базе быстрых бридеров и тепловых реакторов, а также решение проблемы накопления ОЯТ.
- **Параллельно с замыканием ЯТЦ должны осуществляться минимизация себестоимости добываемого урана и оптимизация использования природного урана в действующих ядерных реакторах.**

Расширение сырьевой базы ВВЭР

- С начала эксплуатации до 2010 года из российских ВВЭР-1000 (9 блоков) выгружено порядка **7000 ТВС**, в топливе которых содержится:
 - уран-235 в количестве 0.7 – 1.2 %,
 - плутоний в количестве 0.6 – 1.3% с содержанием делящихся изотопов в плутонии от 75% до 65%.
- Путем обогащения выделенного из выгоревшего топлива урана можно в принципе получить регенерированное урановое топливо с содержанием изотопа уран-235 около 5.1%. Из него можно изготовить порядка **1500 ТВС**, эквивалентных по энергопотенциалу ТВС, изготовленным из природного урана, обогащенного до 4.95%. Из-за повышения содержания урана-232 при обогащении регенерата необходимо разбавлять его природным ураном.
- Выделенного из выгоревшего топлива плутония достаточно для изготовления порядка **800 МОХ ТВС**, эквивалентных по энергопотенциалу ТВС, изготовленным из природного урана, обогащенного до 4.95%.

Проблемы Ядерной Энергетики

- Контроль и управление нейтронным полем – практически решена;
- Контроль и управление генерацией энергии – практически решена;
- Контроль и управление отводом энергии – требует инновационных подходов;
- Преобразование энергии – требует инновационных подходов;
- Контроль и управление нуклидными составами и нуклидными потоками – требует наибольших вложений ресурсов, времени и интеллекта, без решения этой проблемы ЯЭ не может стать основой устойчивого развития

Институциональная особенность развития энергетики:

Происходит постепенный переход с этапа развития в условиях либеральной экономики, опирающегося на принцип «можно все, что не запрещено»

К эпохе «конституциональной» экономики, на котором используется принцип «можно только то, что разрешено».

Но единой окончательной модели, предназначенной для разработки законодательства в области использования энергии или для определения того, какая институциональная база наилучшим образом может обеспечить осуществление национального законодательства в области энергетики, не существует.

Эмпирически наблюдаемая закономерность

- При хорошей энергетике может быть плохая экономика, но при плохой энергетике не может быть хорошей экономики
- Хорошая энергетика и адекватное управление природными процессами возможно только при росте научного знания, опережающем наши физические возможности.

ОСНОВЫ ИННОВАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ХОЗЯЙСТВОВАНИЯ:

Знание как самоценное общественное достояние - источник и предпосылка эффективной деятельности человека и важнейший инструмент, определяющий взаимоотношения людей внутри общества и человека и окружающей средой.

Инновационная энергетика на основе синергетического взаимодействия традиционных энерготехнологий и инновационной ядерной энергетики - Хорошая энергетика и адекватное управление природными процессами возможно только при опережающем наши физические возможности росте научного знания. Эффективная АЭ должна помочь решить те проблемы, с которыми уже не справляется органическая энергетика и еще не может справиться возобновляемая.

Инновационные технологии - при пренебрежении исследовательскими задачами в целях опережающего наши физические возможности познания окружающей среды и нас самих, мы генерируем слишком много проблем, не решаемых на пути развития отдельных технологий, без увязывания их в единую систему.

Статья 47. Хранение и переработка ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов

- При хранении и переработке ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов должна обеспечиваться надежная защита работников объектов использования атомной энергии, населения и окружающей среды от недопустимого в соответствии с нормами и правилами в области использования атомной энергии радиационного воздействия и радиоактивного загрязнения. Хранение радиоактивных отходов должно рассматриваться в качестве этапа их подготовки к переработке или к захоронению. Временное технологическое хранение облученных тепловыделяющих сборок ядерных реакторов в целях повышения безопасности и снижения затрат при последующем обращении с ними и их переработка в целях извлечения из них ценных компонентов осуществляются в соответствии с законодательством Российской Федерации. Переработка отработавшего ядерного топлива в целях извлечения из него ценных компонентов должна осуществляться в соответствии с законодательством Российской Федерации.

Статья 48. Хранение или захоронение радиоактивных ОТХОДОВ

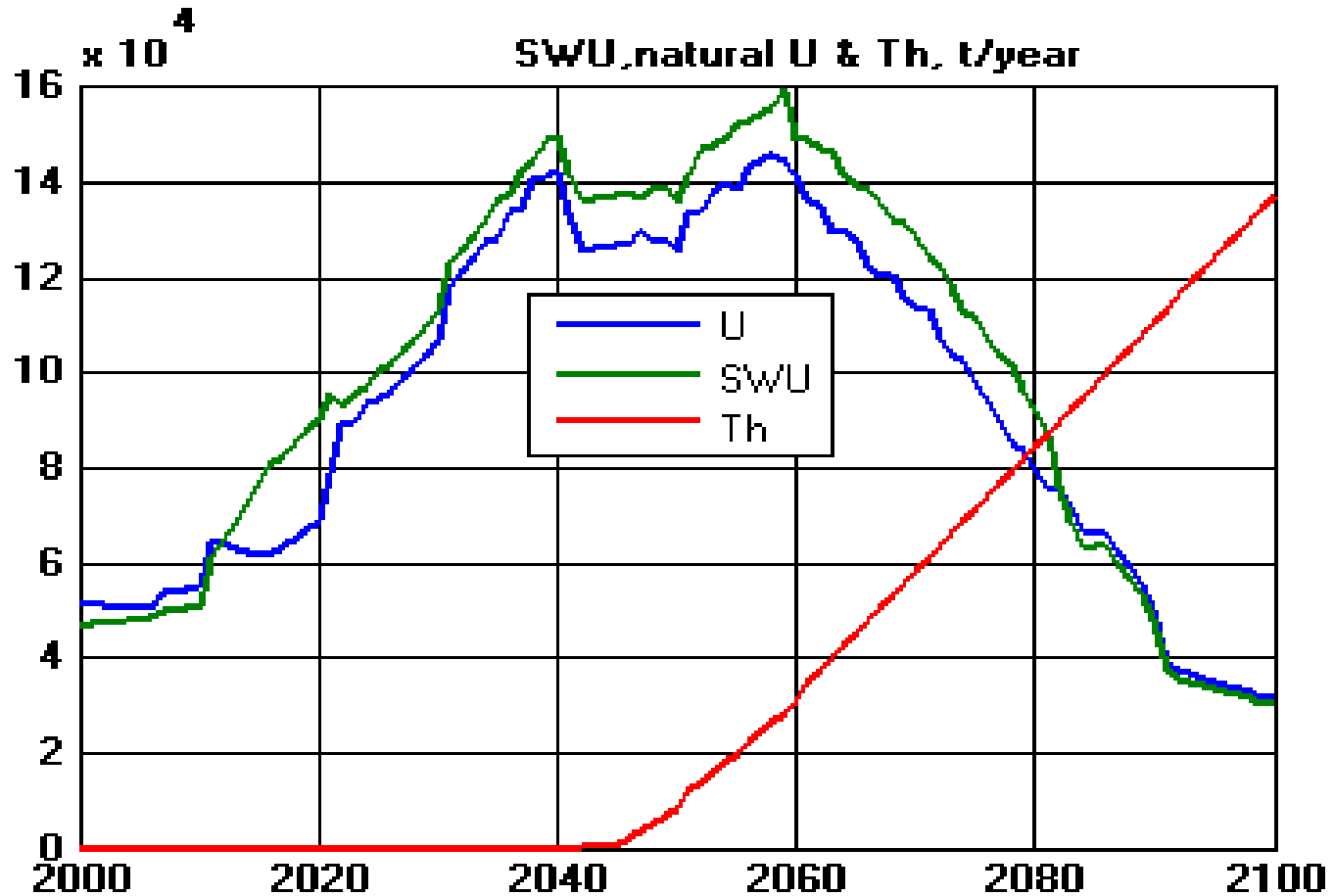
- При хранении или при захоронении радиоактивных отходов должны быть обеспечены их надежная изоляция от окружающей среды, защита настоящего и будущих поколений, биологических ресурсов от радиационного воздействия сверх установленных нормами и правилами в области использования атомной энергии пределов. Хранение или захоронение радиоактивных отходов допускается только в специально предназначенных для этого пунктах хранения. Хранение или захоронение радиоактивных отходов должно предусматриваться проектной или технической документацией в качестве обязательного этапа любого цикла ядерной технологии. Порядок организации, сбора и захоронения радиоактивных отходов, а также органы, осуществляющие данную деятельность, определяются Правительством Российской Федерации в соответствии с законодательством Российской Федерации.

Возможности совершенствования существующих объектов ЯЭ и наполнения структуры ЯЭ недостающими компонентами.

Специфические задачи для различных типов реакторов

- Реакторы на тепловых нейтронах – расширение области использования ЯЭ, минимизация количества плутония в ЯТЦ, инвестиции в развитие ЯЭ как системы;
- Реакторы на быстрых нейтронах – обеспечение нейтронного баланса в системе ЯЭ;
- Жидкотопливные реакторы - минимизация количества минорных актинидов в системе ЯЭ;
- Термоядерные источники нейтронов – повышение темпов вовлечения тория-232 и урана-238 в ядерный топливный цикл, повышение нейтронного потенциала системы ЯЭ.

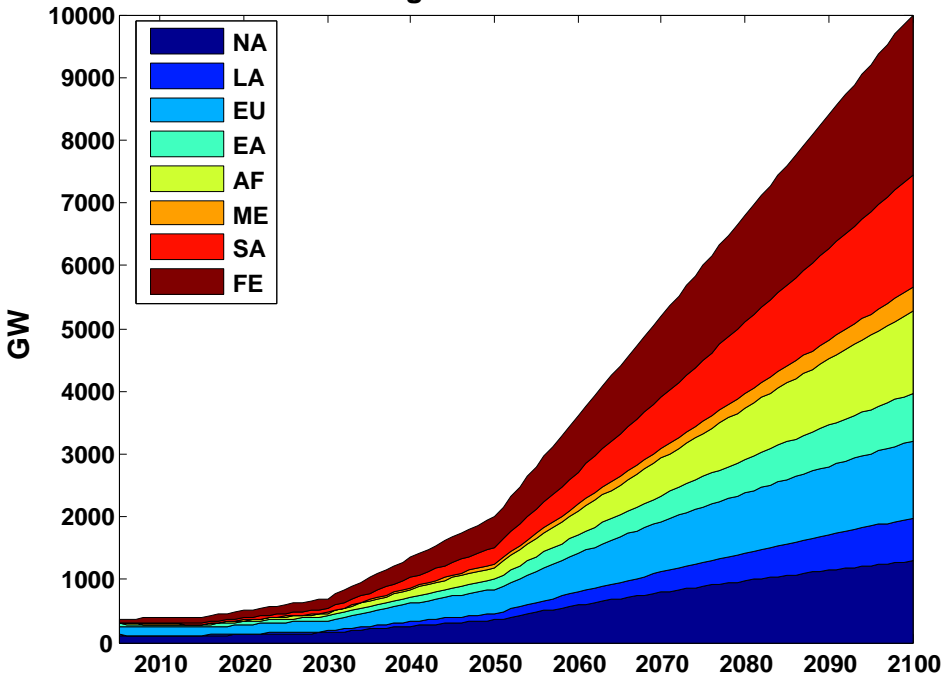
Мировая Ядерная Энергетика с ТИН



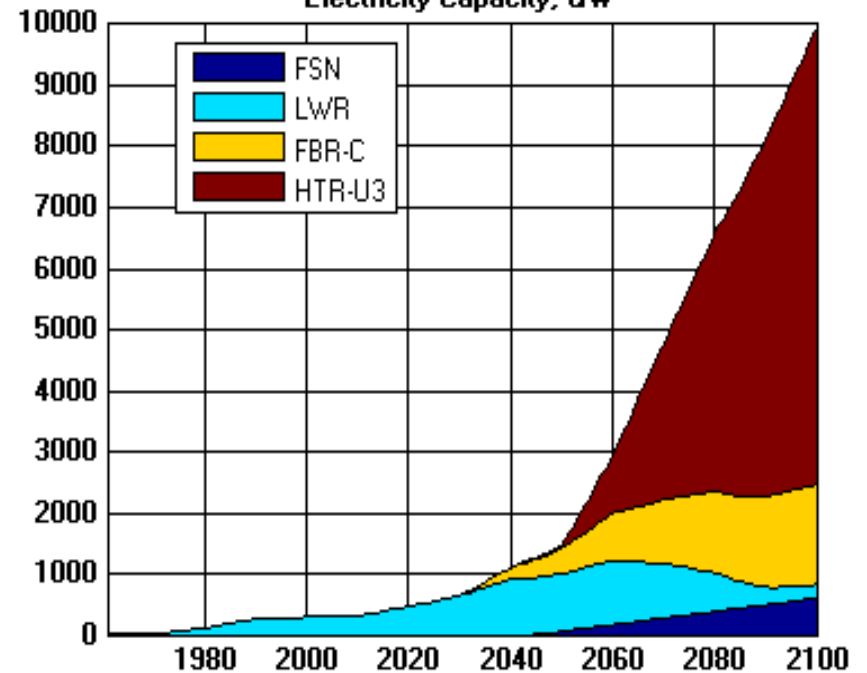
Расход природного урана до 2100г - 10 млн.т

Максимальный сценарий развития ЯЭ с Термоядерным Источником Нейтронов

high scenario of NE



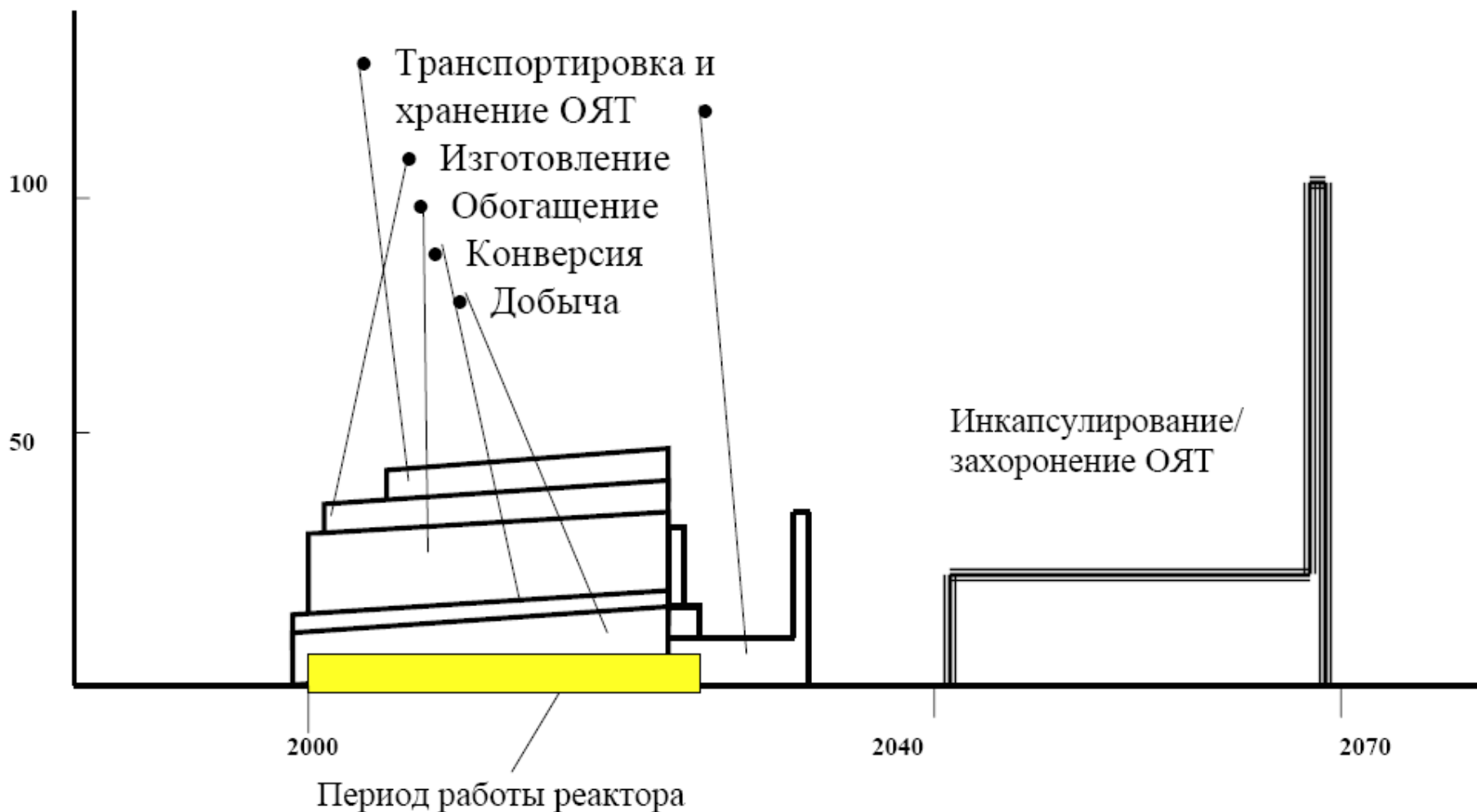
Electricity Capacity, GW



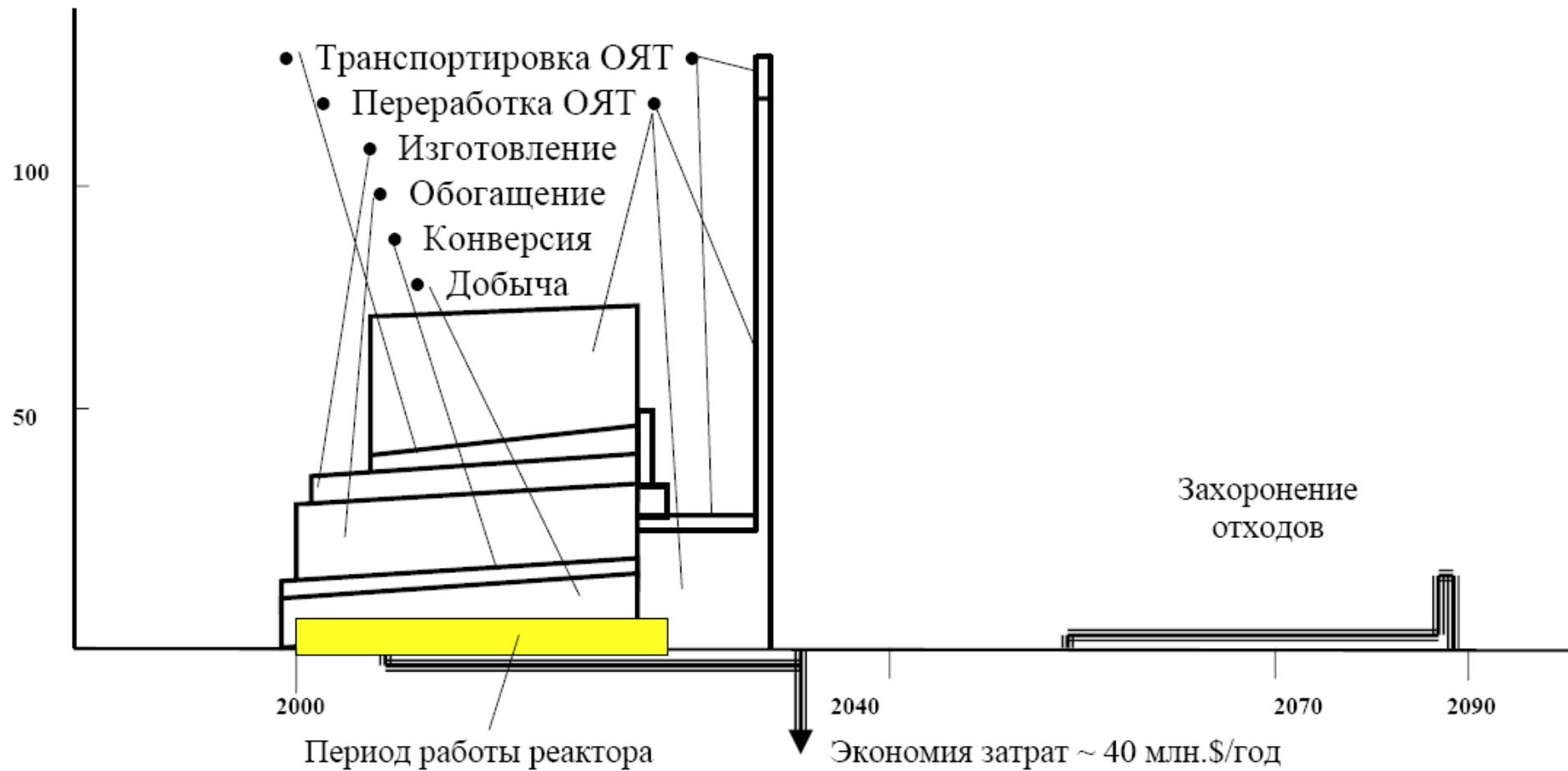
Необходимо замыкание топливного цикла

Доля ТИН в системе менее 10%

Движение денежных средств в топливном цикле реактора PWR (вариант с прямым захоронением ОЯТ), в млн. \$/год.



Движение денежных средств в топливном цикле реактора PWR (вариант с переработкой), в млн. \$/год.



Выявление проблем– необходимое условие развития

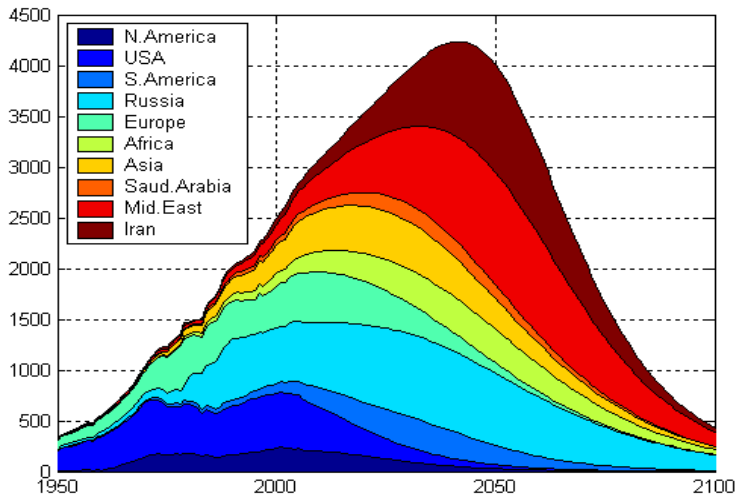
Необходимое условие решения проблем:

- Выявление противоречий
- Расширение постановки задачи
- Рассмотрение данной задачи как части более сложной системы
- Углубление модели и расширение образа объекта
- Увеличение временных рамок рассмотрения

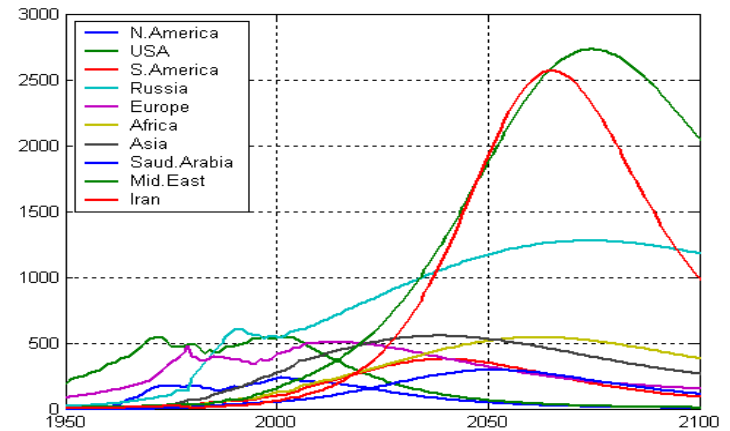
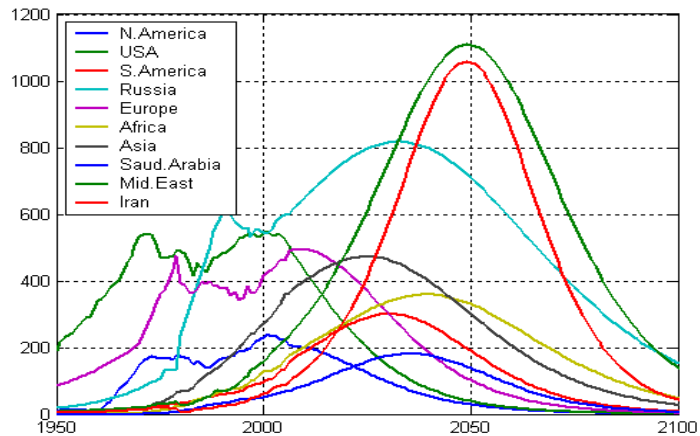
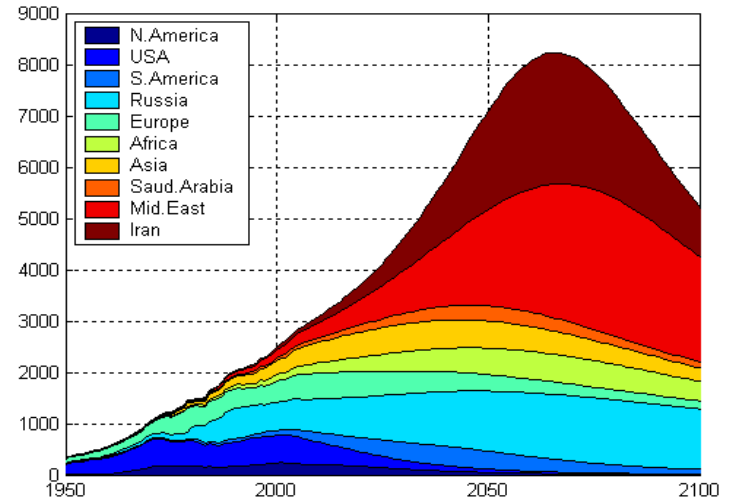
Добыча газа

(2005:уже добыто 86 трлн. куб.м ; доказанные резервы 180 трлн.. куб.м)

300 трлн. куб.м

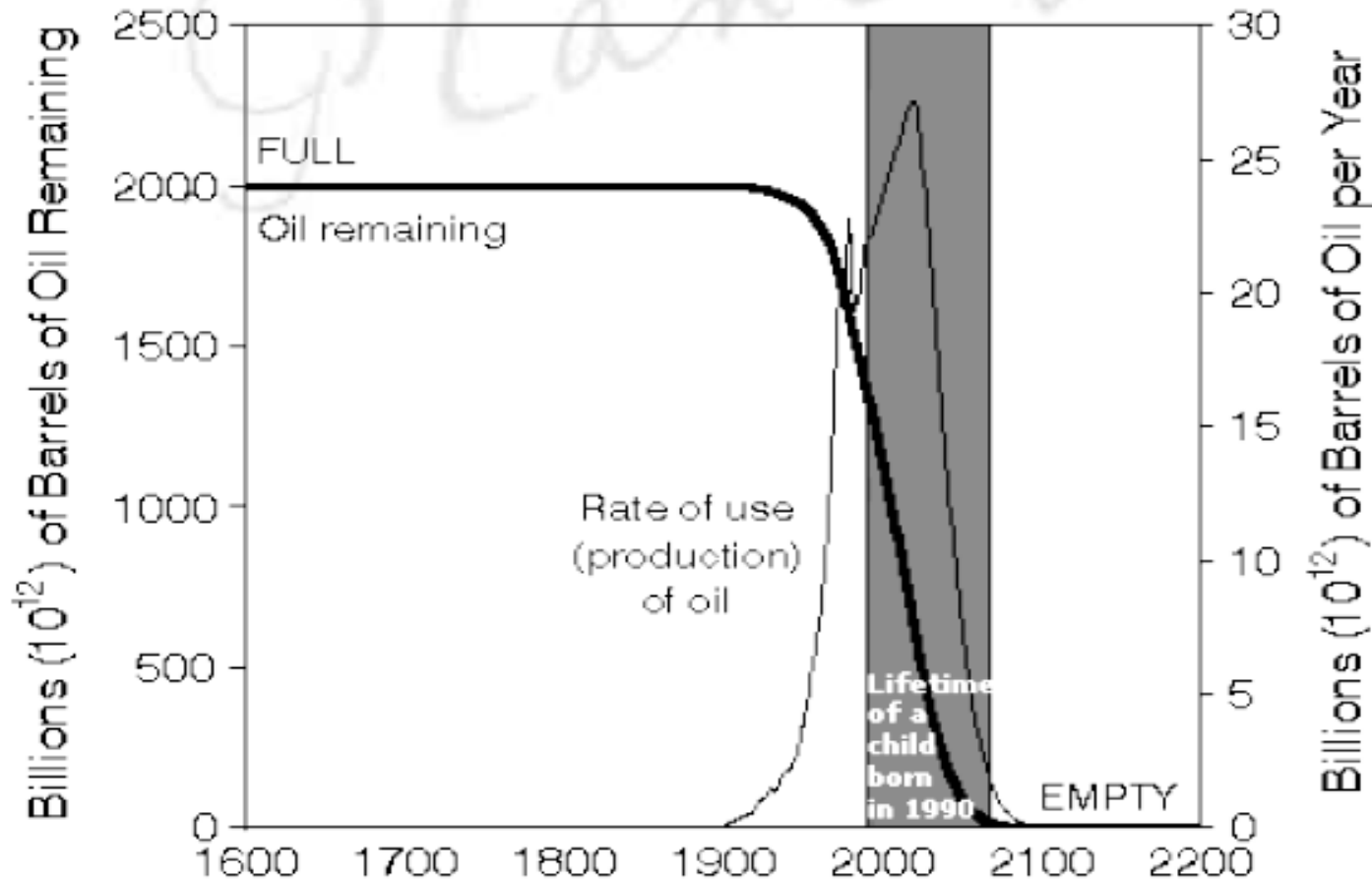


800 трлн. куб.м



GLOBAL RESOURCES ANALYSIS

World's Oil Reserves

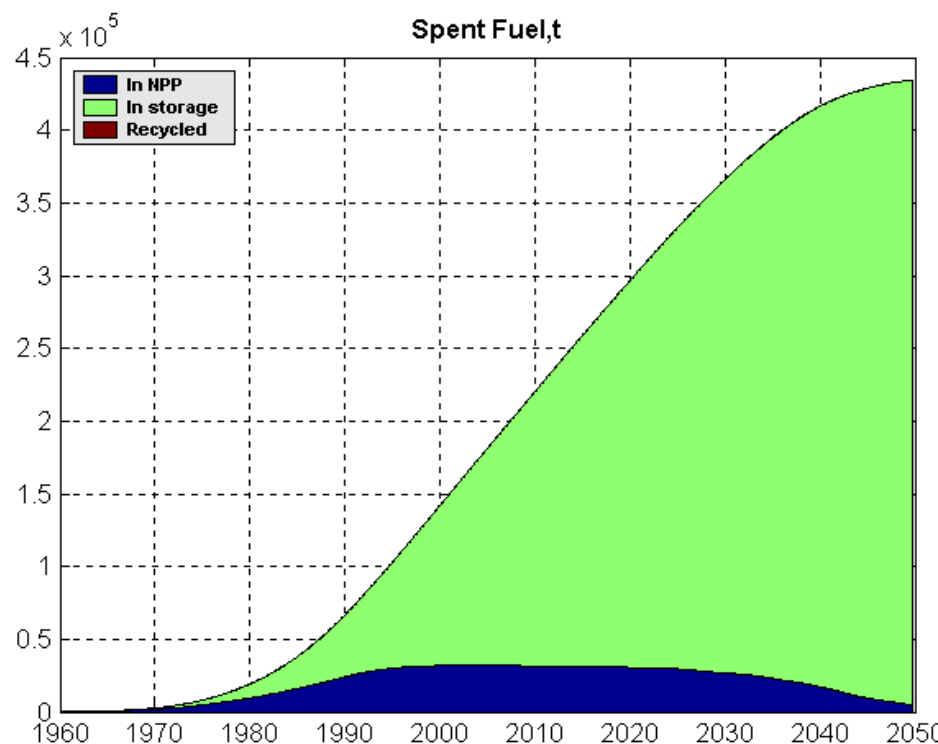
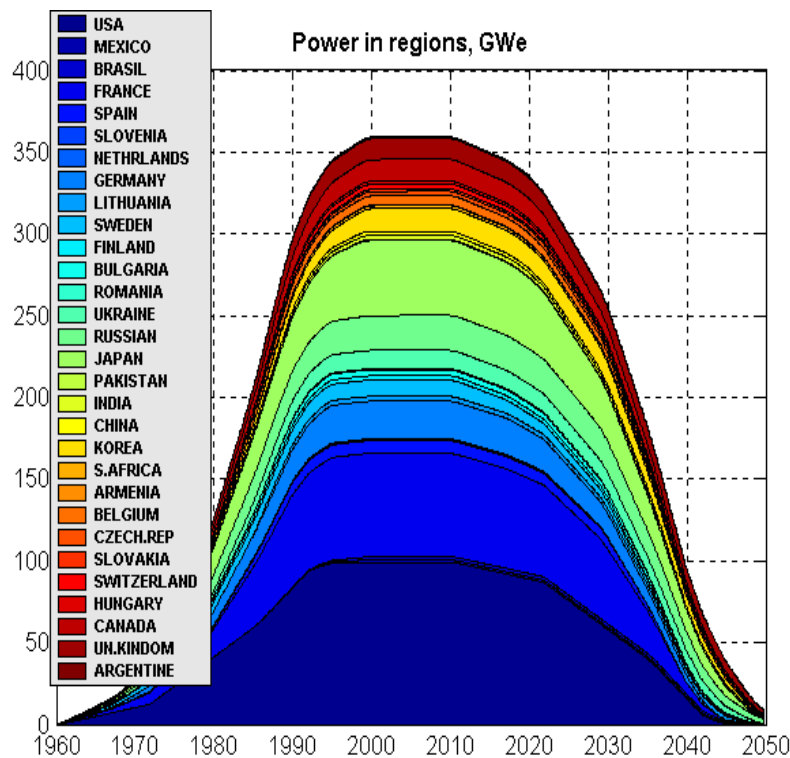


Planck.

Суммарная информация по типам реакторов

Тип реактора	Работающие	строящиеся	Долговременная остановка	Остановлены	Планируются
BWR	81	4	1	33	9
FBR	2	2	1	7	5
GCR	15			37	
РБМК	15			9	
PHWR	48	5		8	
PWR/ВВЭР	222/51	45/15		28/14	56/22
Итого	434	72	2	149	92

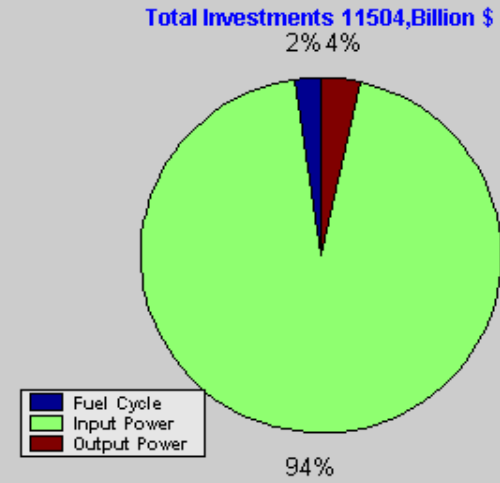
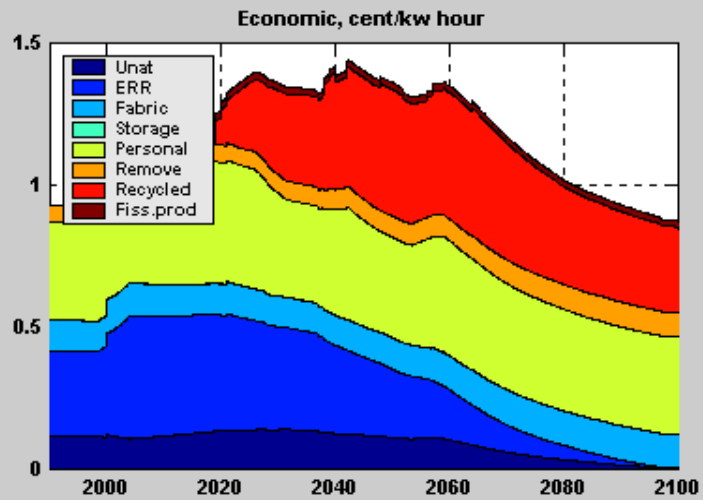
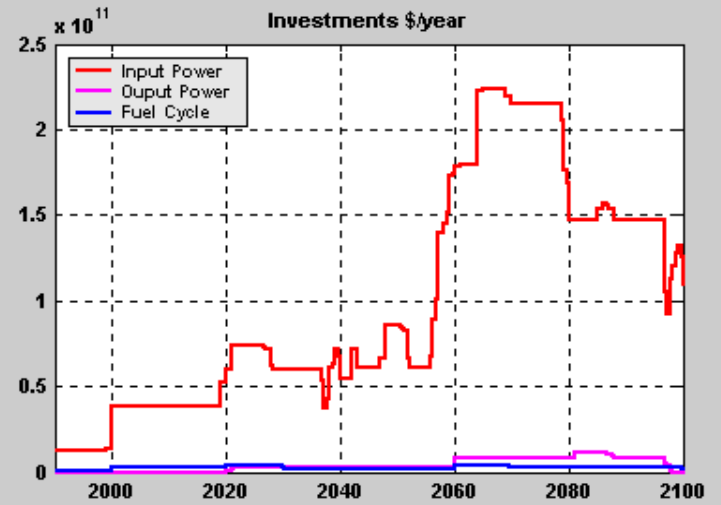
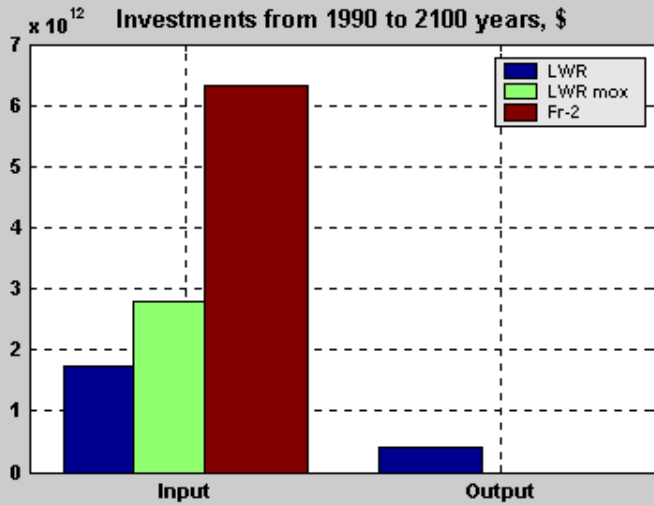
Современная ЯЭ и источники опасности



Основные опасности:

Начало развития ЯЭ – реакторы

Начало второй фазы развития ЯЭ – ЯТЦ (отвалы, ОЯТ, РАО)



Общими целями для ИНПРО являются:

- способствовать тому, чтобы ядерная энергетика в 21 веке оказалась способной внести достойный вклад в удовлетворение энергетических потребностей устойчивого развития человечества;
- объединить все заинтересованные государства-участники, как обладателей, так и пользователей технологий, для совместной выработки международных и внутригосударственных мер, необходимых для осуществления инноваций в ядерных реакторах и топливных циклах. Обеспечить использование в инновационном процессе высоких и экономически конкурентоспособных технологий, отличающихся повышенной безопасностью, минимальными риском распространения и воздействия на окружающую среду;
- создать механизм вовлечения всех заинтересованных сторон, которые смогли бы оказать позитивное влияние и посильную помощь в деятельности существующих организаций, а также в поддержке развивающихся инициатив на национальном и международном уровнях.

Экономические аспекты

Базовый принцип: Энергия и связанные с ней изделия и услуги от ИЯЭС должны быть доступны в плане наличия (технически реализуемы) и приемлемы по цене (экономически доступны)

Требования пользователя:

- *Все затраты по жизненному циклу, входящие в данную систему, должны быть учтены, и стоимость произведенной ядерной энергии должна быть конкурентоспособной относительно стоимости энергии альтернативных источников;*
- *Общий объем инвестиций, требующийся для проектирования, строительства и ввода в эксплуатацию инновационной ядерной энергетической системы включая процентную ставку за период строительства, должен быть таким, чтобы необходимые фонды инвестирования могли быть созданы;*
- *Риск инвестиций в ИЯЭС должен быть приемлемым для инвесторов с учетом риска инвестирования в другие энергетические проекты;*
- *Инновационные энергетические системы должны предоставлять возможность эффективного производства энергии на разных рыночных пространствах.*

ИНПРО: Ядерная энергетическая система (ЯЭС) (Nuclear Energy System)

охватывает полный спектр ядерных установок и связанных с ними институциональных мер.

В состав ядерных установок входят:

- установки для добычи и обогащения урана и/или тория, изготовления ядерного топлива,
- производства электроэнергии либо иной продукции,
- регенерации ядерного топлива,
- захоронения РАО

В жизненном цикле таких установок рассматриваются приобретение площадки, проектирование, строительство, изготовление и монтаж оборудования, ввод в эксплуатацию, эксплуатация, вывод из эксплуатации и освобождение либо закрытие промышленной площадки.

Институциональные меры состоят из соглашений, договоров, национальных и международных правовых рамок и конвенций (таких как ДНЯО, Международная конвенция по ядерной безопасности, Соглашение МАГАТЭ по гарантиям).

ИНПРО: Инновационная ядерная энергетическая система (ИЯЭС)

это система, которая позволяет ядерной энергетике обеспечить значительный вклад в глобальное энергоснабжение 21-го века.

ИЯЭС может включать как эволюционные, так и инновационные конструкции ядерных установок.

- **Эволюционная конструкция**— такая усовершенствованная конструкция, которая достигает улучшений по сравнению с существующими конструкциями за счет небольших либо умеренных модификаций с сильным уклоном на сохранение апробированной конструкции с целью сведения технического риска к минимуму.
- **Инновационная конструкция** является усовершенствованной конструкцией, которая включает радикальные концептуальные изменения в конструкторских решениях либо компоновке систем по сравнению с существующей практикой.

Понятие Системы

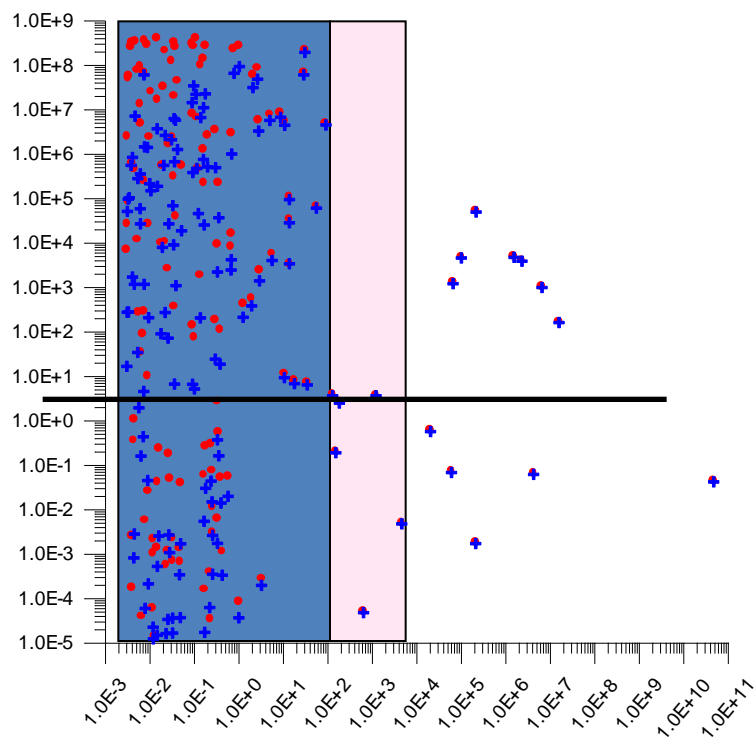
- Понятие Системы тесно связано с понятиями целостности, структуры, связи, элемента, отношения, подсистемы и др.
- Достаточно полное понимание предполагает построение семейства соответствующих определений:
 - целостности,
 - структурности,
 - взаимозависимости С. и среды,
 - иерархичности (каждый компонент С. в свою очередь может рассматриваться как С., а исследуемая в данном случае С. представляет собой один из компонентов более широкой С.),
 - *множественности описания каждой С. (в силу принципиальной сложности каждой С. её адекватное познание требует построения множества различных моделей, каждая из которых описывает лишь определённый аспект С.) и др.*

Относительная активность

ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ

ТЯЖЕЛЫХ НУКЛИДОВ

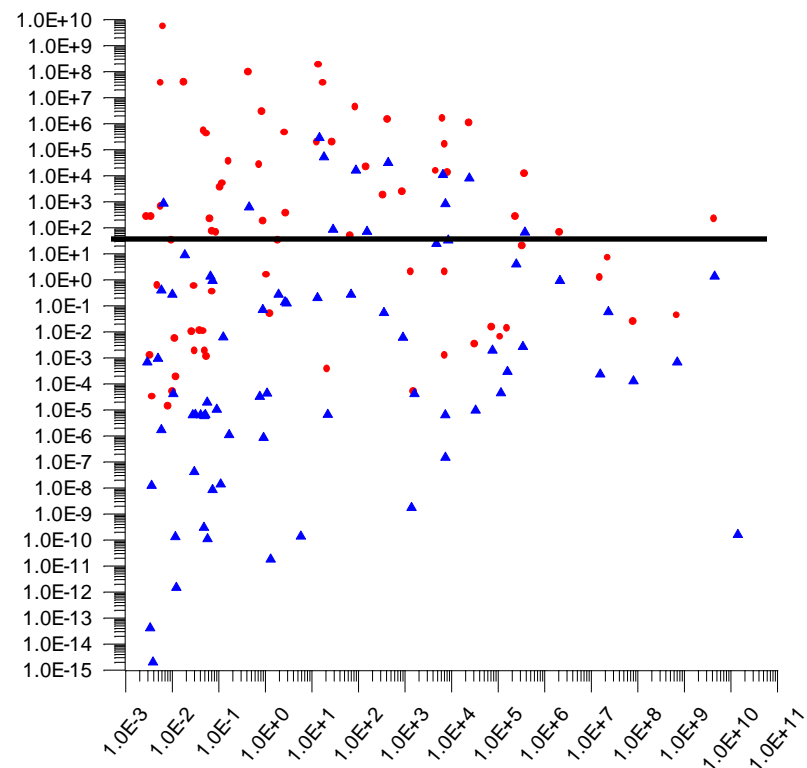
Относительная активность



Период полураспада, лет

- - система в целом
- + - промежуточное хранилище продуктов деления

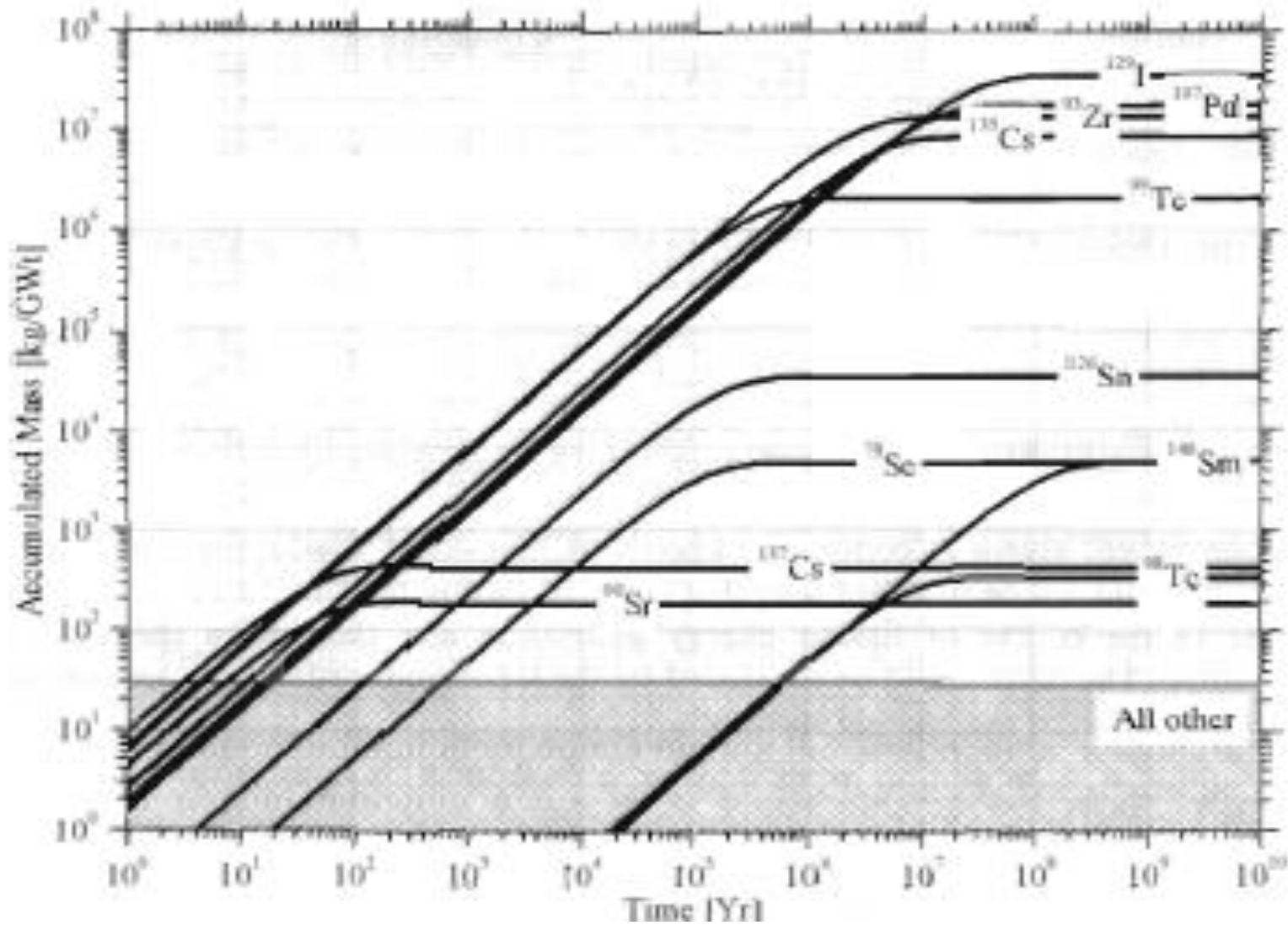
Относительная активность



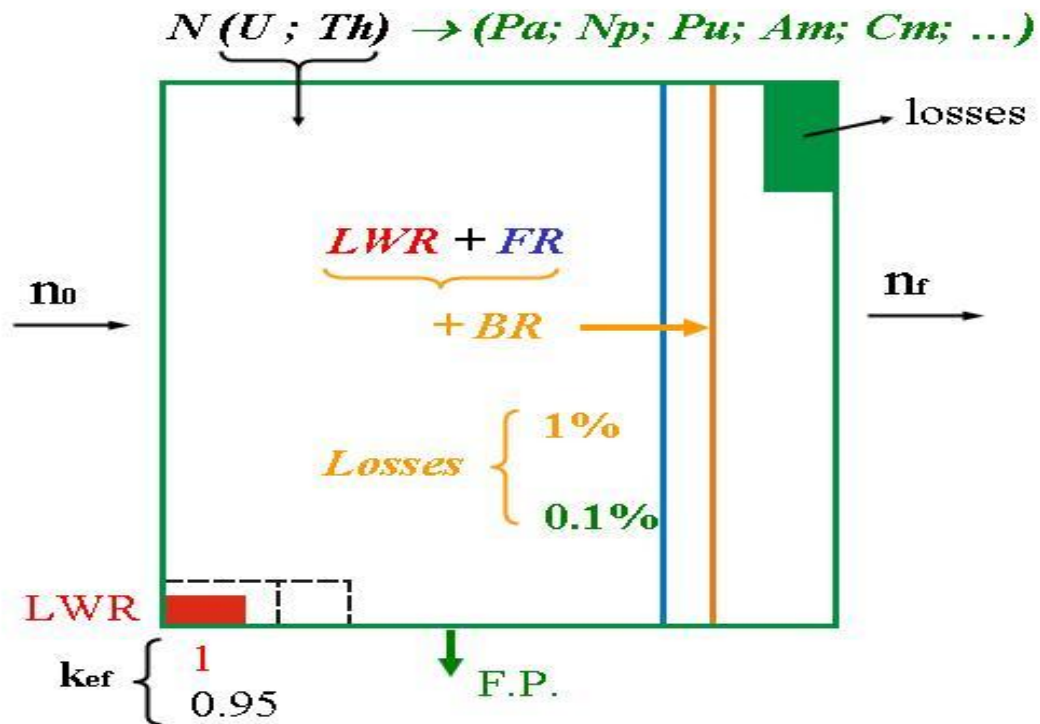
Период полураспада, лет

- - система в целом
- ▲ - промежуточное хранилище отходов переработки

Накопление продуктов деления (M.Saito...)



Потенциалы повышения эффективности использования ядерного топлива (от С.М.Фейнберга к ИНПРО)



Neutron gain : $NG = (n_f - n_0)/N$

	FR	LWR
U - 238	0,62	0
U - 235	0.88	0.62
Th-232	0.39	0.24

Возможные варианты накопления нуклидов в системе ЯЭ

Замыкание ЯТЦ по требуемому нуклиду

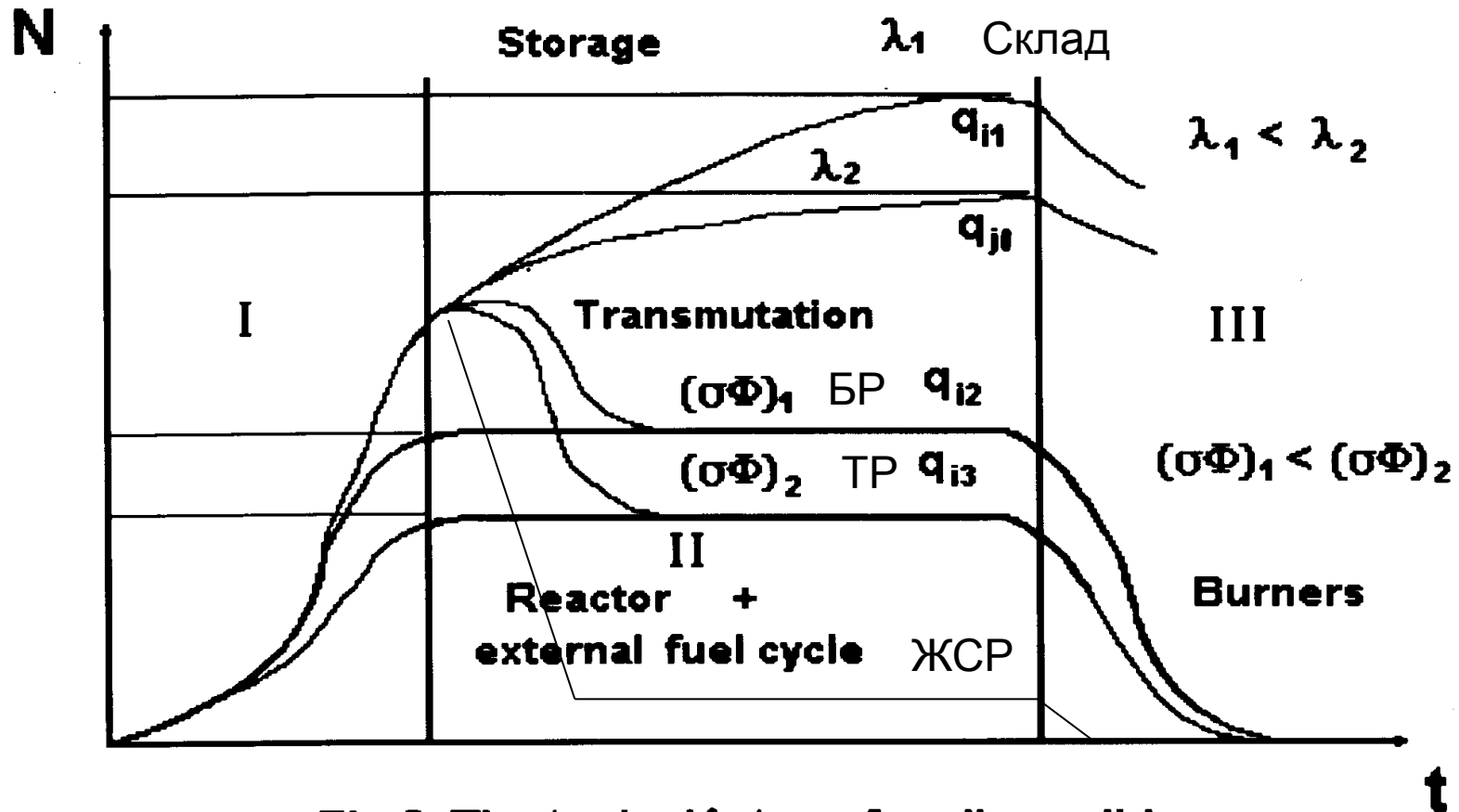
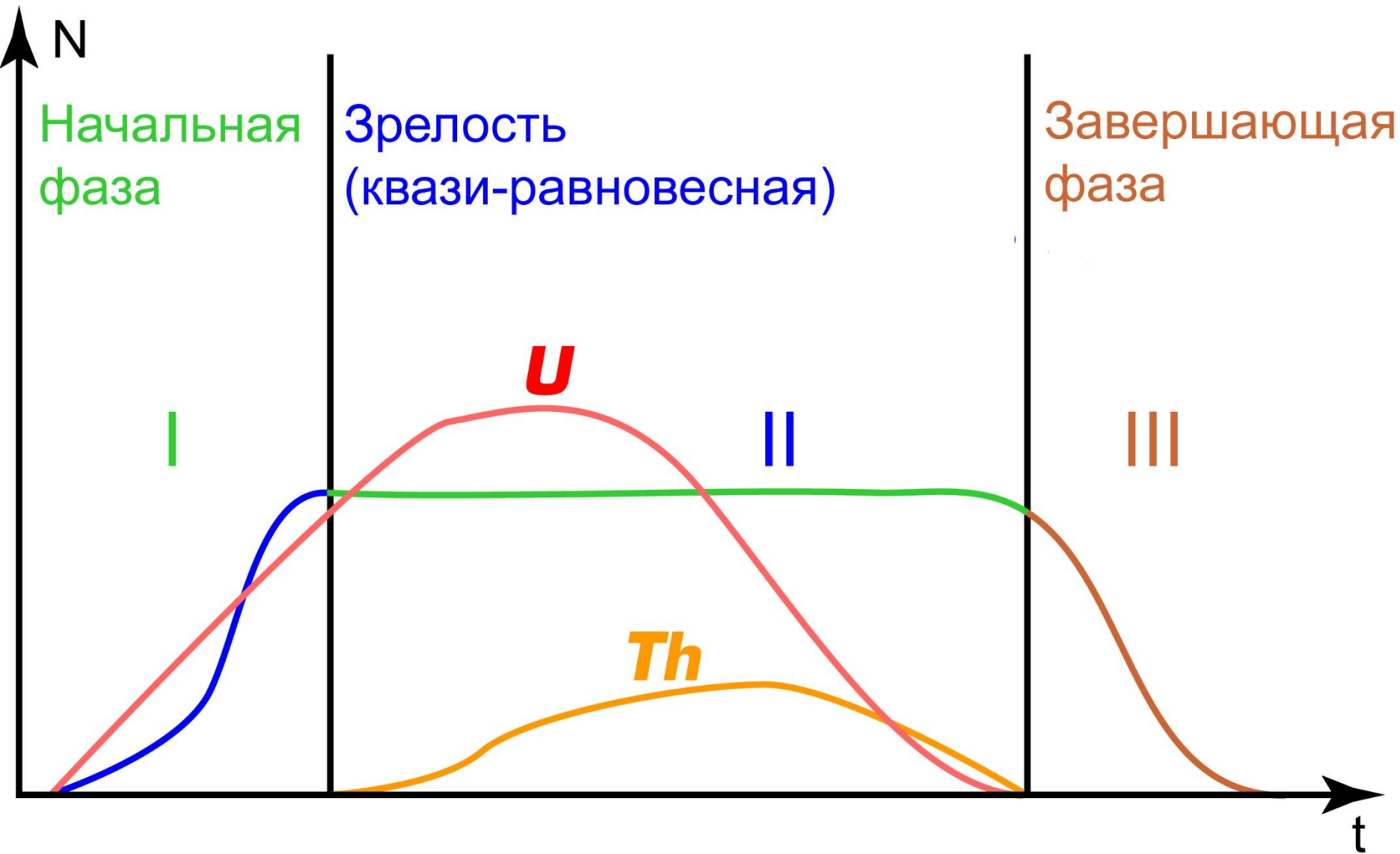


Fig.3. The typical fates of radionuclide

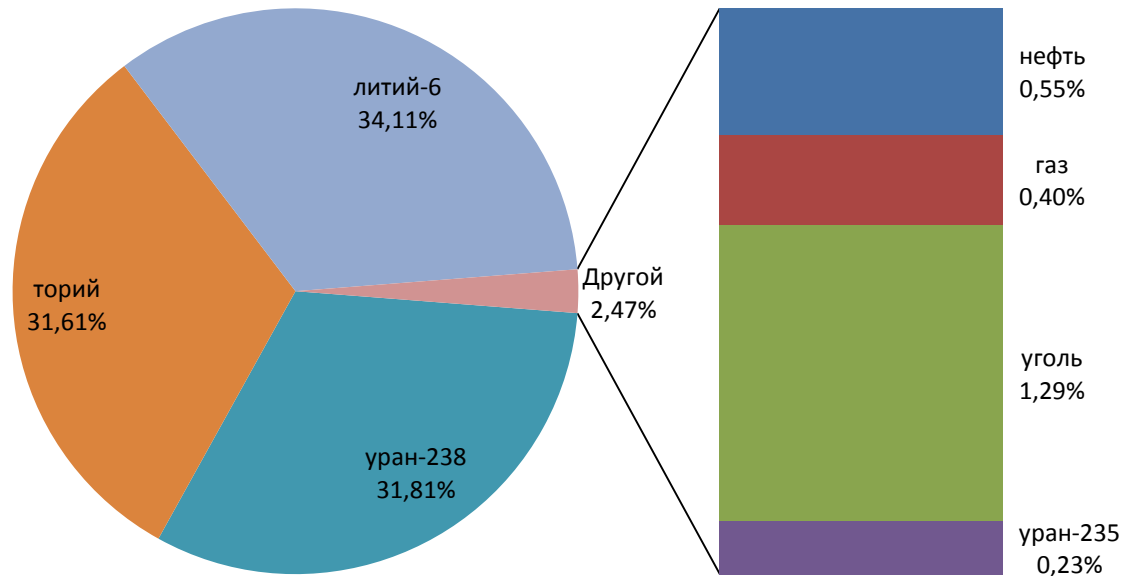


Сравнение некоторых параметров различных топливных циклов развитой ЯЭ

Характеристики носят оценочный характер и нормированы на 1000 ГВт(э) мощности системы ЯЭ

	Открытый ЯТЦ	Замкнутый ЯТЦ	
		U-Pu	U-Pu-Th
Добыча, т/год: Уран	200 000	1000	200
Торий	-	-	800
Работа разделения, млн.кг ЕРР/год	150	-	-
Изготовление топлива, т/год: активная зона	20 000	18 000	19 000
экраны БР	-	5000	2000
Переработка ОЯТ, т/год: активная зона	-	18 000	19 000
экраны БР	-	5000	2000
ЖСР	-	200	70
Захоронение т.а., т/год	20 000	30-100	30-100
Поступление актинидов в захоронение, т/год: Pu	200	1,5	0,4
Np	10	0,01	0,005
Am	10	0,05	0,01
Cm	1	0,02	0,003
Ожидаемая коллективная эффективная доза (10 ⁴ лет) при производстве 1000 ГВт лет электроэнергии, 10 ³ чел.Зв	100-150	10-15	2-5

Мировое распределение энергетических ресурсов, %



Исходные предположения:

согласно оценкам «Красной книги» [2] предполагается, что мировые ресурсы тория составляют 7 млн. т; тритий производится только из лития-6, мировые ресурсы лития приняты по данным U.S. Geological Survey [4].

Мировые энергетические ресурсы, млрд. т.н.э.

нефть	газ	уголь	уран-235	уран-238	торий	литий-6	итого
236	169	552	98	13577	13489	14555	42676