



Атомная энергетика в России и мире.

Состояние и Развитие

Проф. Б.И. Нигматулин
Институт проблем энергетики

Памятка

Всяк входящий в сей кабинет, с просьбой о финансовой поддержке проекта или разработки, прежде всего задай себе вопрос и запомни:

1. Кто купит?
2. Как платят? При этом, файды* должно быть побольше, а азап* поменьше!
3. Если Вас могут «кинуть», то «кинут обязательно»!

Однако, если Вам не дали денег, то это не катастрофа, это значит, что:

- Вы не сможете потратить их впустую, или
- у Вас их не украдут, или
- Вы не сможете сделать нечестный поступок, украсть их самому.

*файда – выгода (тат.)

*азап – хлопоты (тат.)

Зам. министра по атомной энергии

Б.И. Нигматулин
июнь 1998 г.

Предисловие

Написать этот отчет мне порекомендовал **Лев Дмитриевич Рябев**, еще более 10-ти лет назад.

1. Основная идея показать, что мировая атомная энергетика на среднесрочную перспективу (до 2050 г.) будет развиваться **только** на традиционных легководных реакторах.
2. Развеять иллюзии о том, что в ближайшие годы (10-15 лет) мировая атомная энергетика станет переходить на двухкомпонентную: с реакторами и на тепловых, и на быстрых нейтронах. Начнётся крупномасштабное развитие замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ).

К сожалению, именно такое «**идеалистическое**» представление продолжают поддерживать многие российские специалисты по атомной энергетике и продвигать в руководстве Росатома.

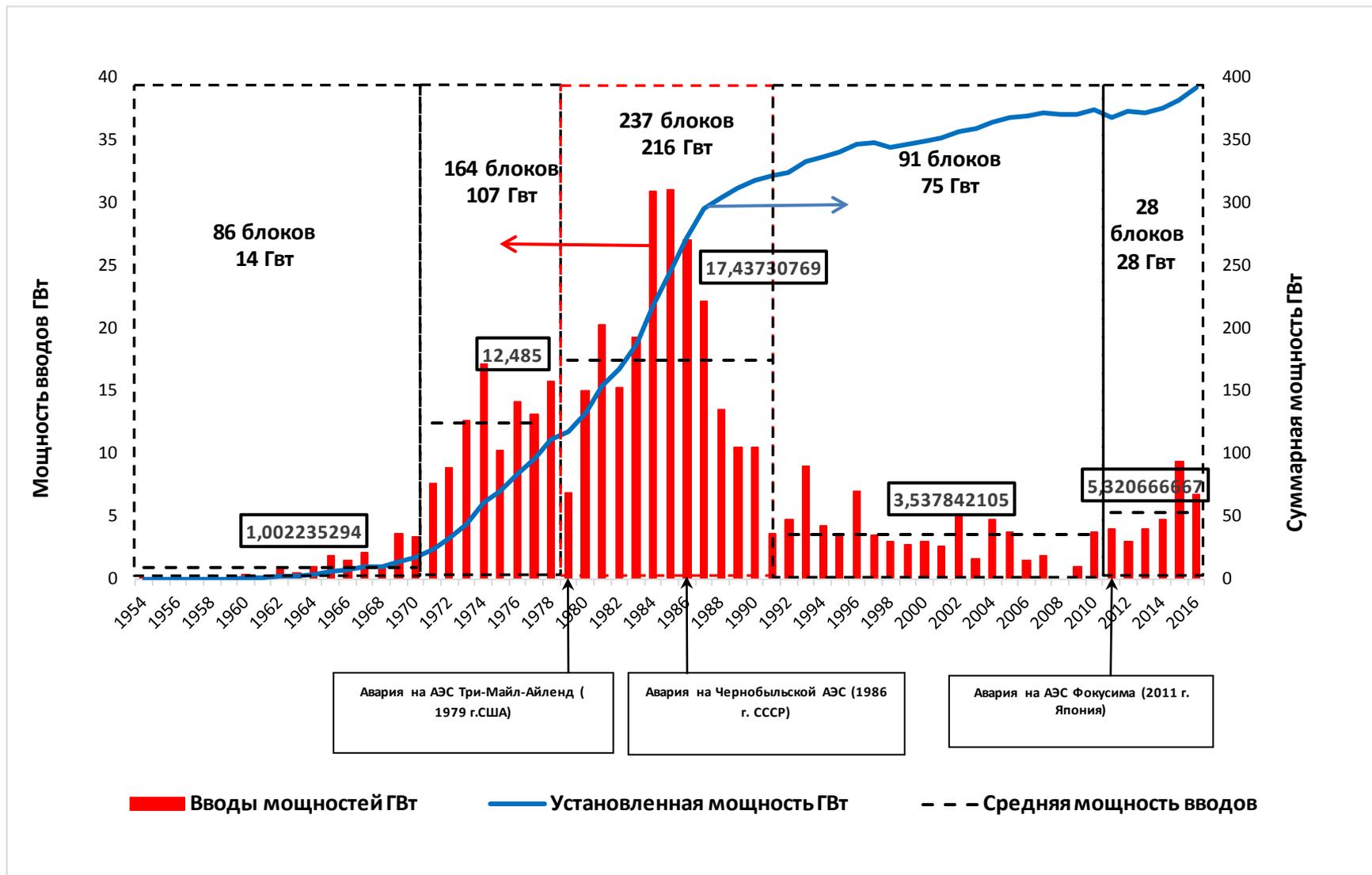


Часть I. Развитие мировой атомной энергетики в период 1954-2015 гг.

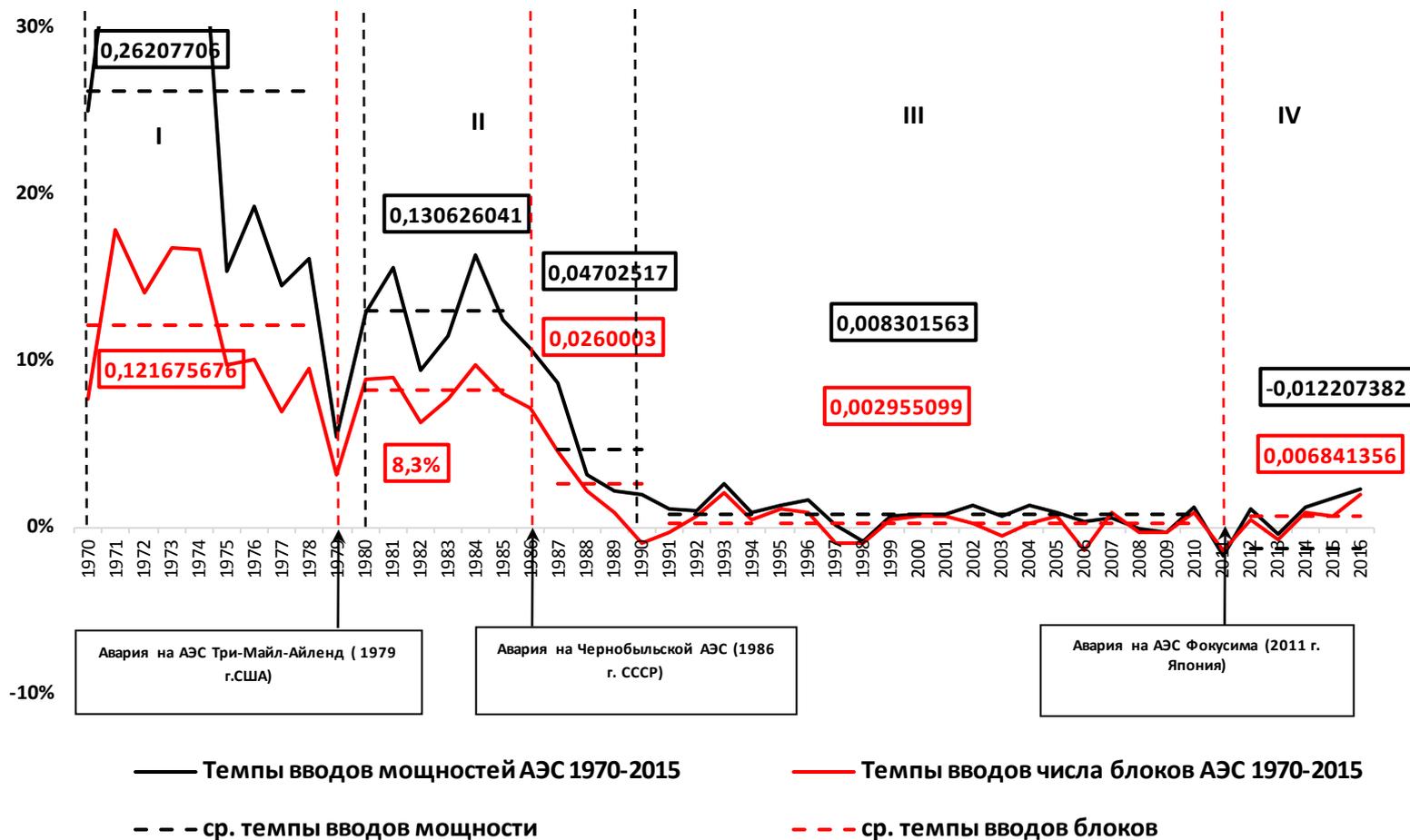
Количество энергоблоков АЭС ежегодно подключённых к сети и находящихся в стадии строительства в мире в период 1954-2015 гг. (отчет МАГАТЭ 2016 г.)



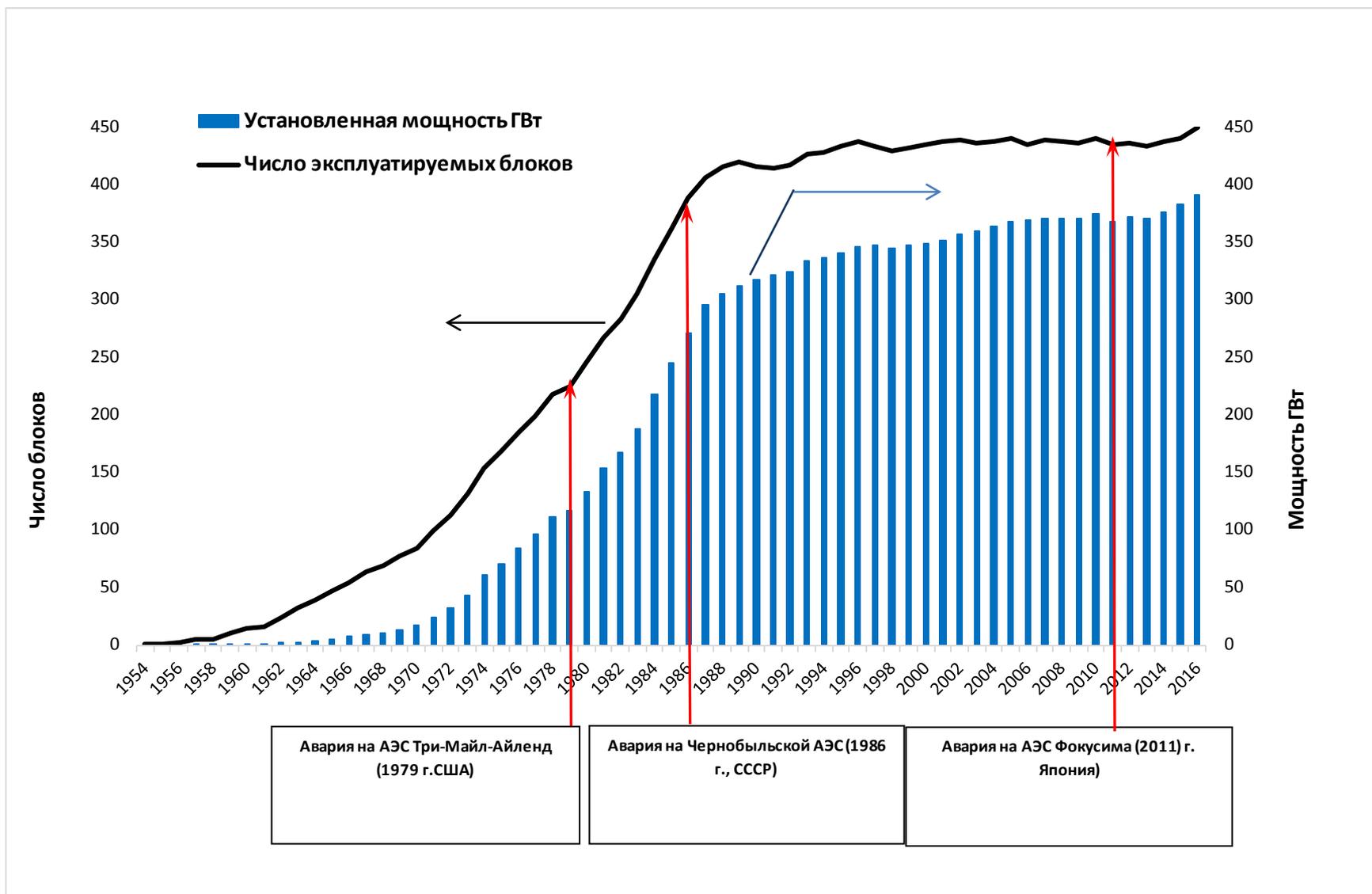
Установленные мощности энергоблоков АЭС, ежегодно подключенных к сети и динамика установленной мощности АЭС в мире, в период 1954-01.12.2016 гг.



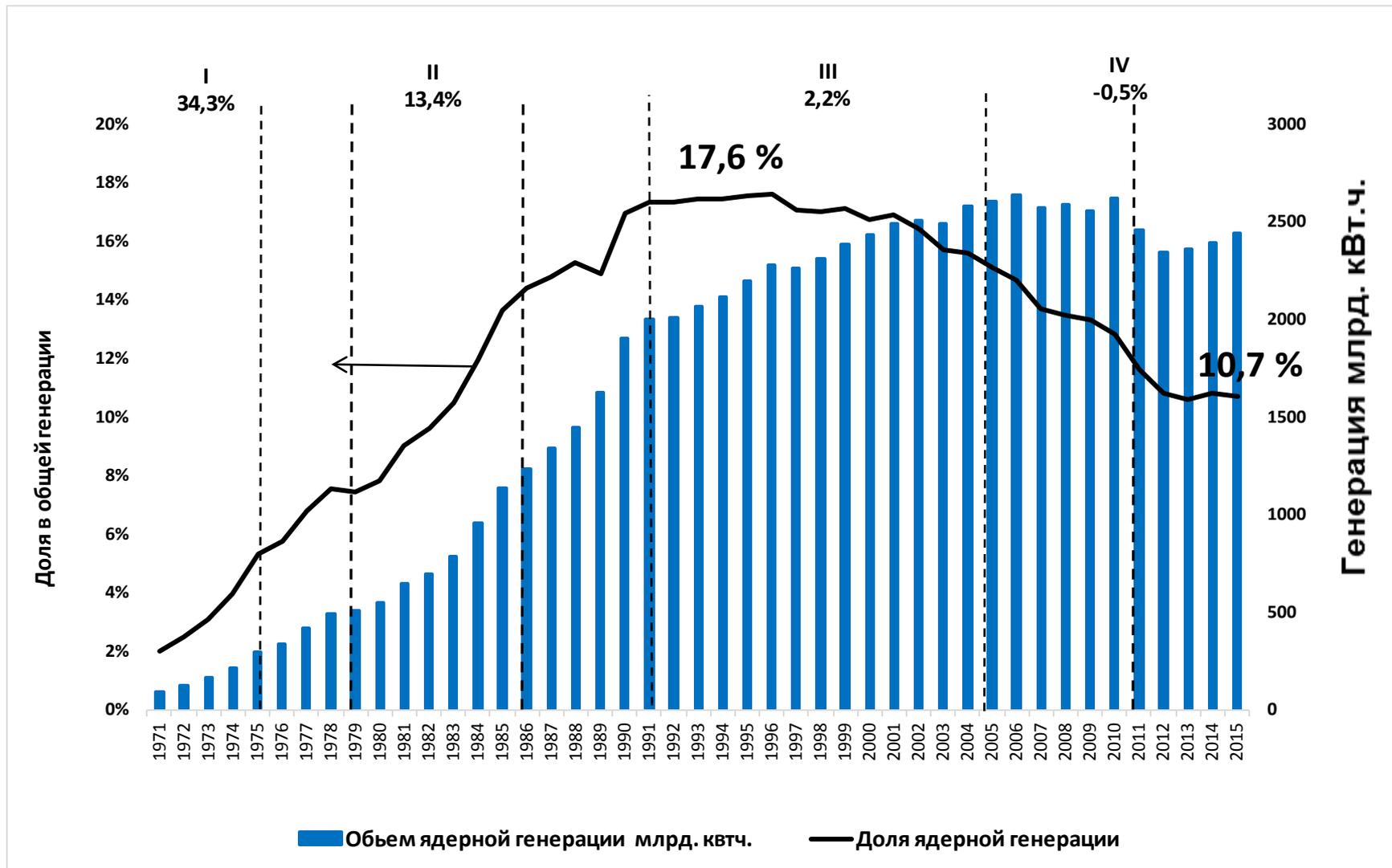
Ежегодные и среднегодовые темпы подключения к сети энергоблоков АЭС и их установленные мощности, в период 1954-01.12.2016 гг.



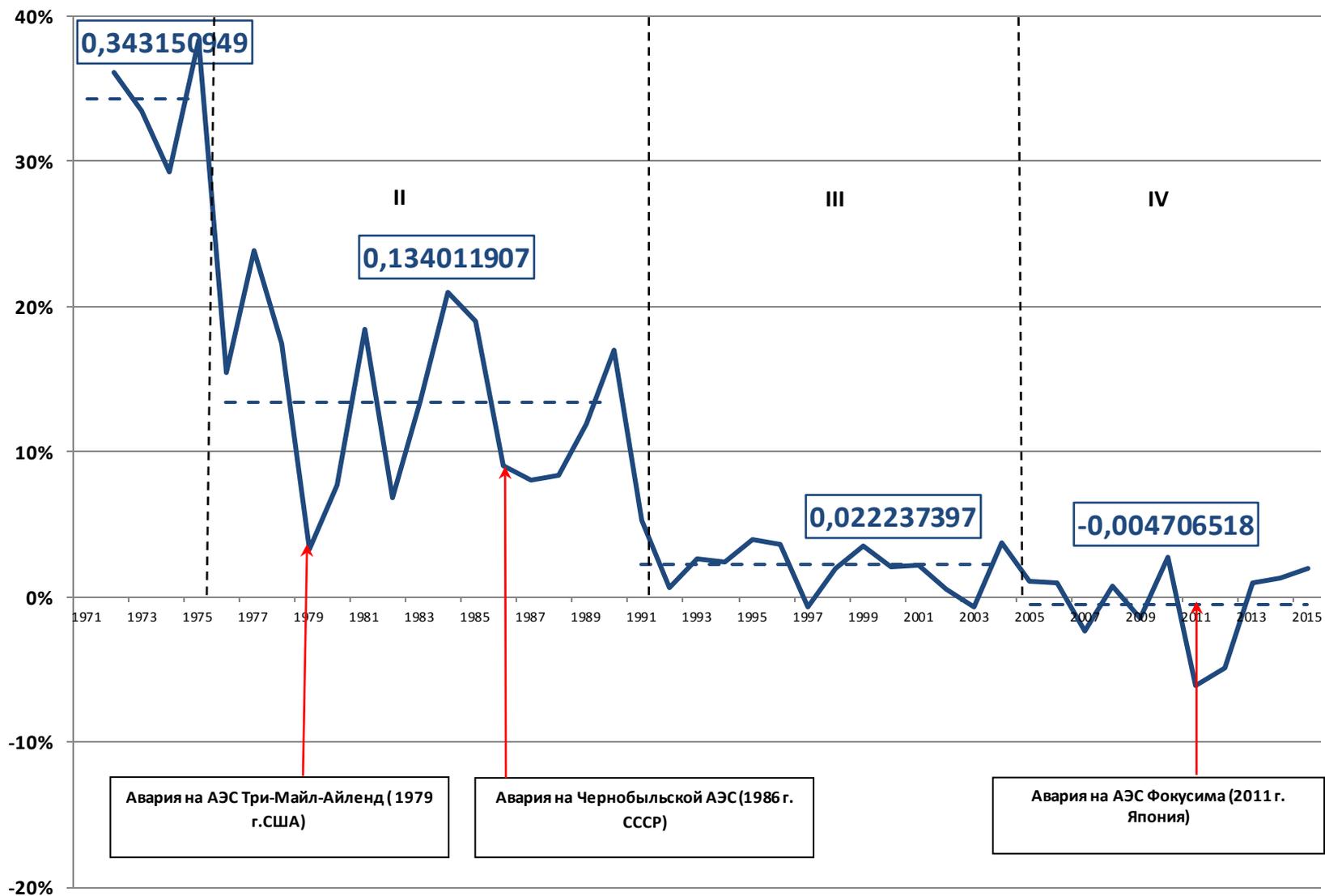
Количество энергоблоков АЭС, находившихся в эксплуатации в мире, и их установленная мощность по годам в период с 1954-2015 гг.



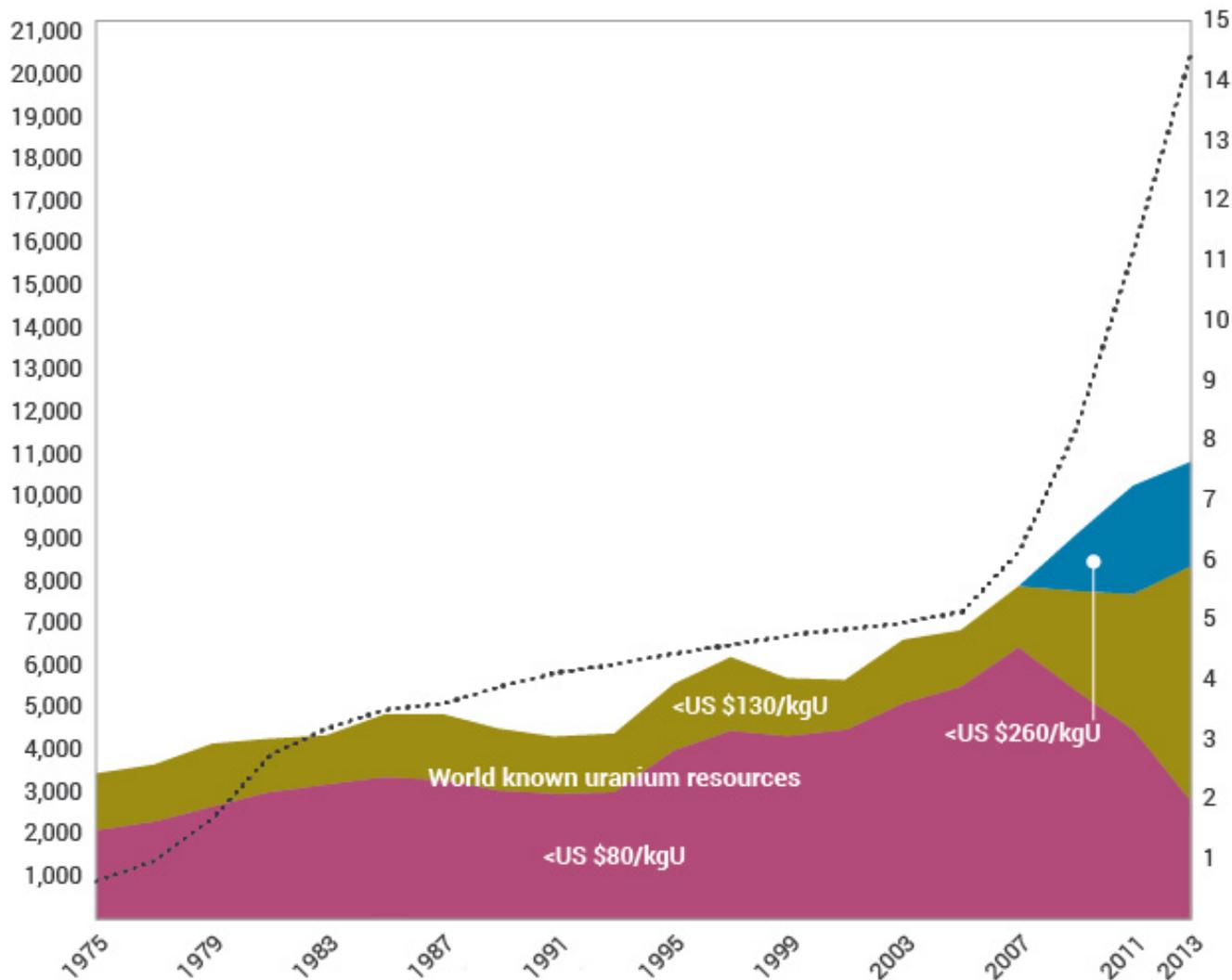
Динамика электропроизводства электроэнергии на АЭС и ее доля в общем объеме производства в мире по годам, в период с 1971-2015 гг. (Для каждого этапа приведены среднегодовые темпы роста электропроизводства).



Ежегодные темпы роста производства электроэнергии на АЭС, в период 1971-2015 гг.



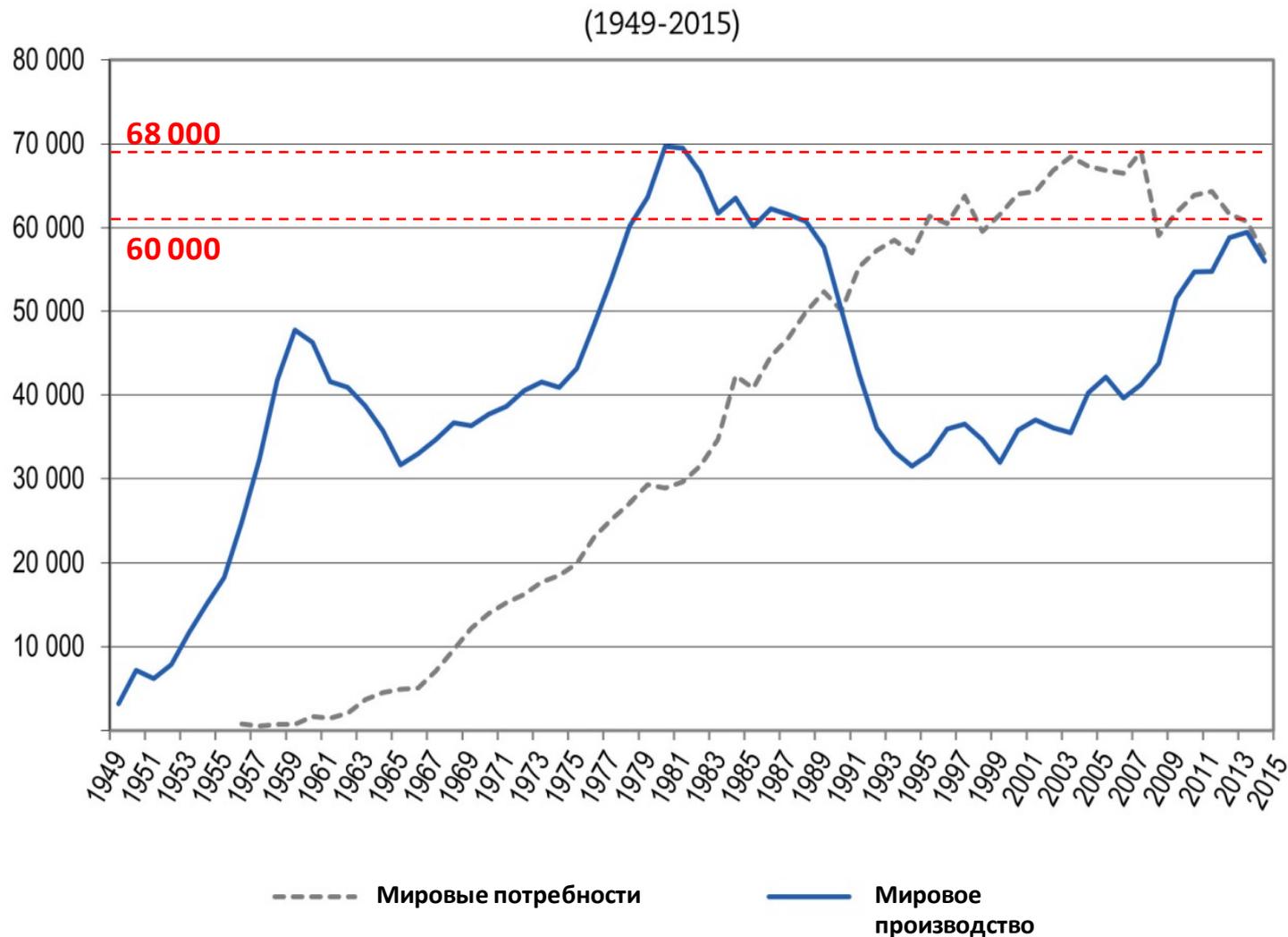
Рост разведанных запасов природного урана в зависимости от себестоимости добычи, по годам в период 1975-2013 гг.



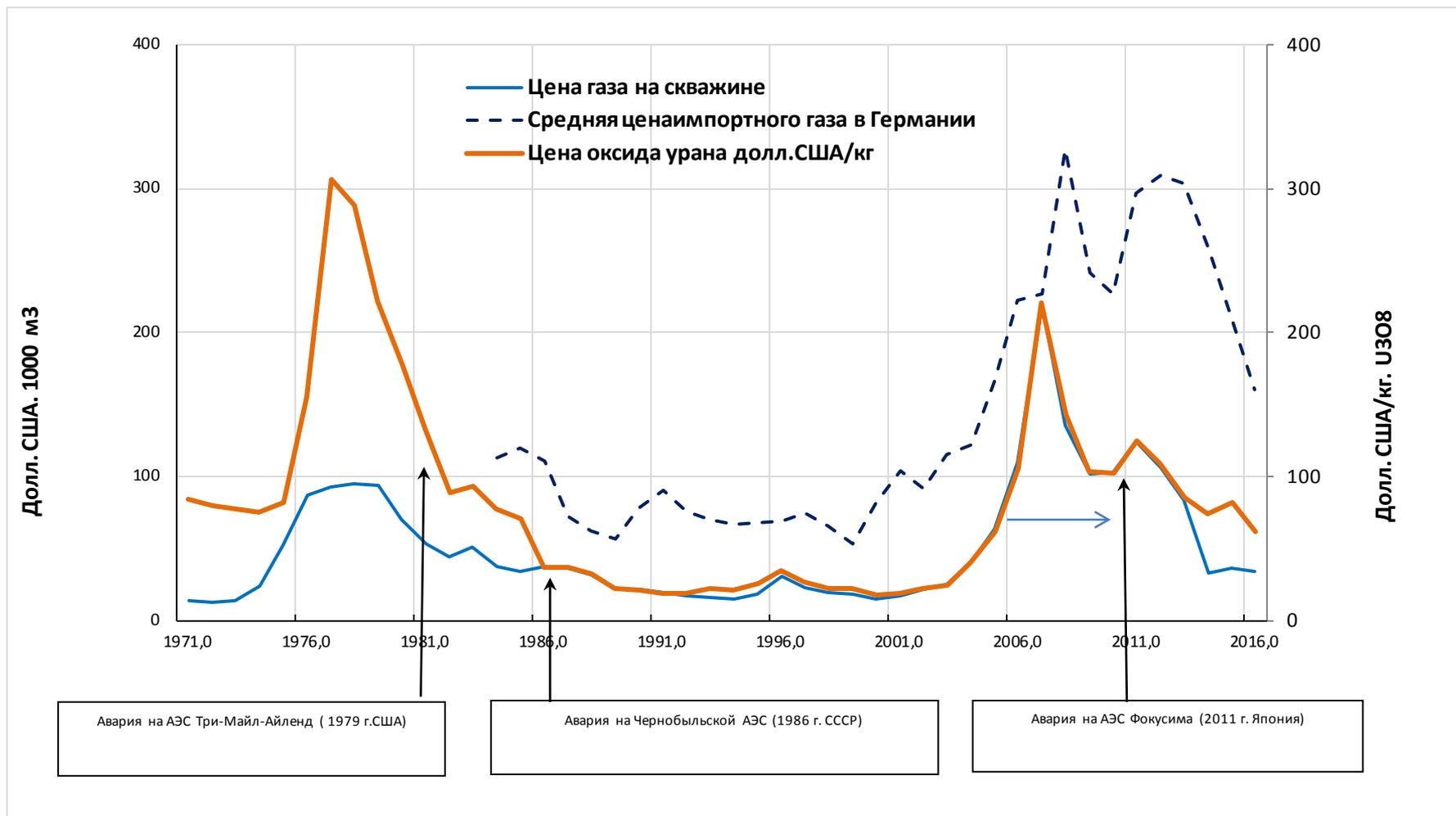
Разведанные запасы урана с различным уровнем себестоимости добычи на 01.01.2015.

Себестоимость добычи	<\$ 40/kgU	<\$ 80/kgU	<\$ 130/kgU	<\$ 260/kgU
	Запасы			
Общие запасы	841 тыс. ТОНН	2695,3 тыс. ТОНН	7659,4 тыс. ТОНН	10188,7 тыс. ТОНН
Извлекаемые запасы	646,9 тыс. ТОНН	2124,7 тыс. ТОНН	5718,4тыс. ТОНН	7641,6 тыс. ТОНН
Разница	194,1тыс. ТОНН	570,6 тыс. ТОНН	1941 тыс. ТОНН	2547,1 тыс. ТОНН
Доля от извлекаемых щapasов	30,0%	26,9%	33,9%	33,3%

Динамика добычи и потребности природного урана для АЭС в мире по годам, в период с 1949-2015 гг.



Динамика среднегодовых цен (в текущих значениях \$) по долгосрочным контрактам природного урана (за 1 кг) и газа (за 1000 м³) на месторождениях в США (т.е. цена газа на устье скважины, без учета расходов на транспортировку) и импортного газа в Германии по годам в период 1971-2016 гг.

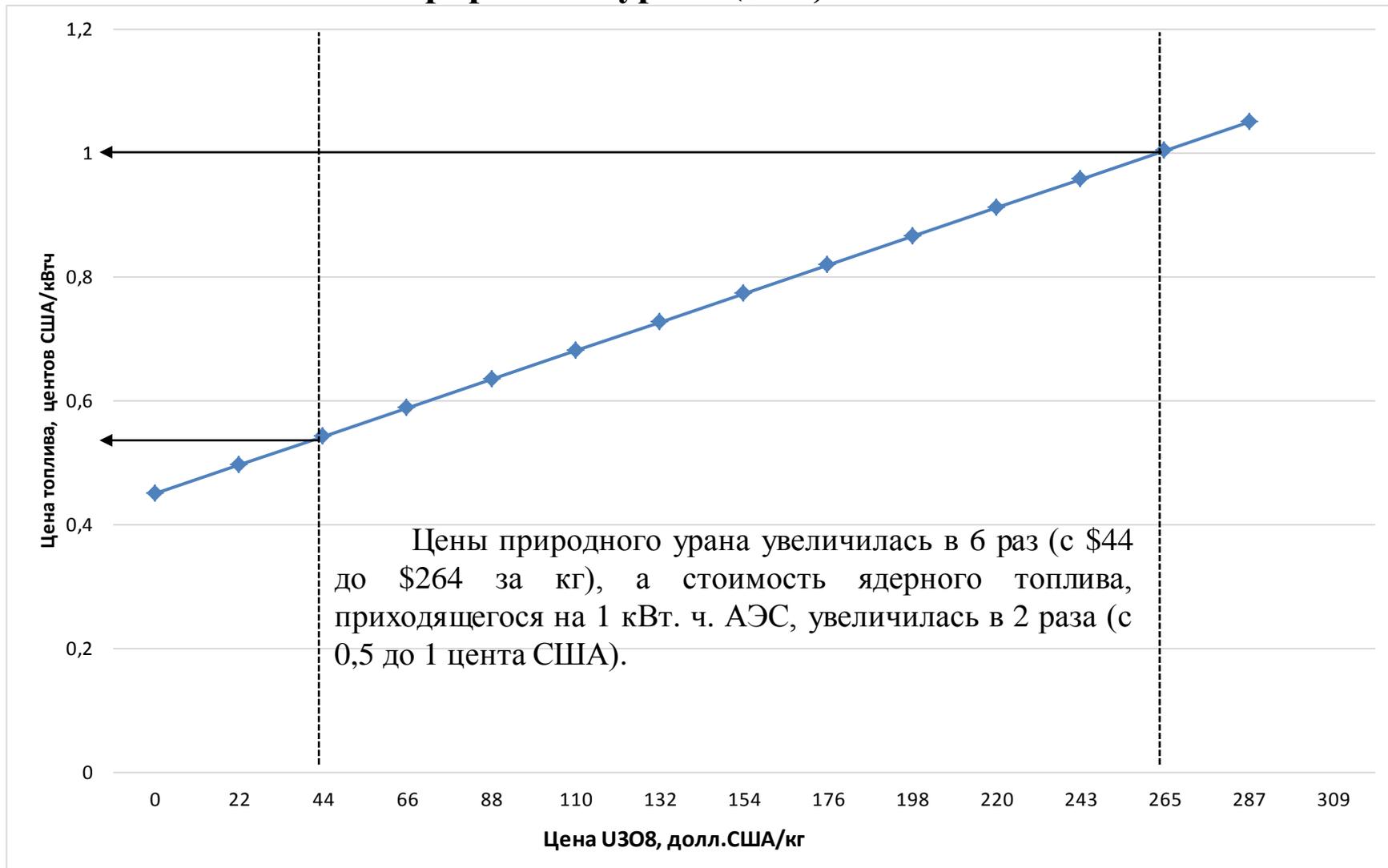


Доля затрат на природный уран в стоимости 1 кВт. ч на шинах АЭС.

На примере США (оценки сверху), на НЕ амортизированных АЭС в стоимости 1 кВт. ч. доля затрат на природный уран составит:

- **3% ÷ 5%** при цене \$71÷104 за 1 кг природного урана
- **6% ÷ 10%** при цене \$ 140÷200 за 1 кг природного урана

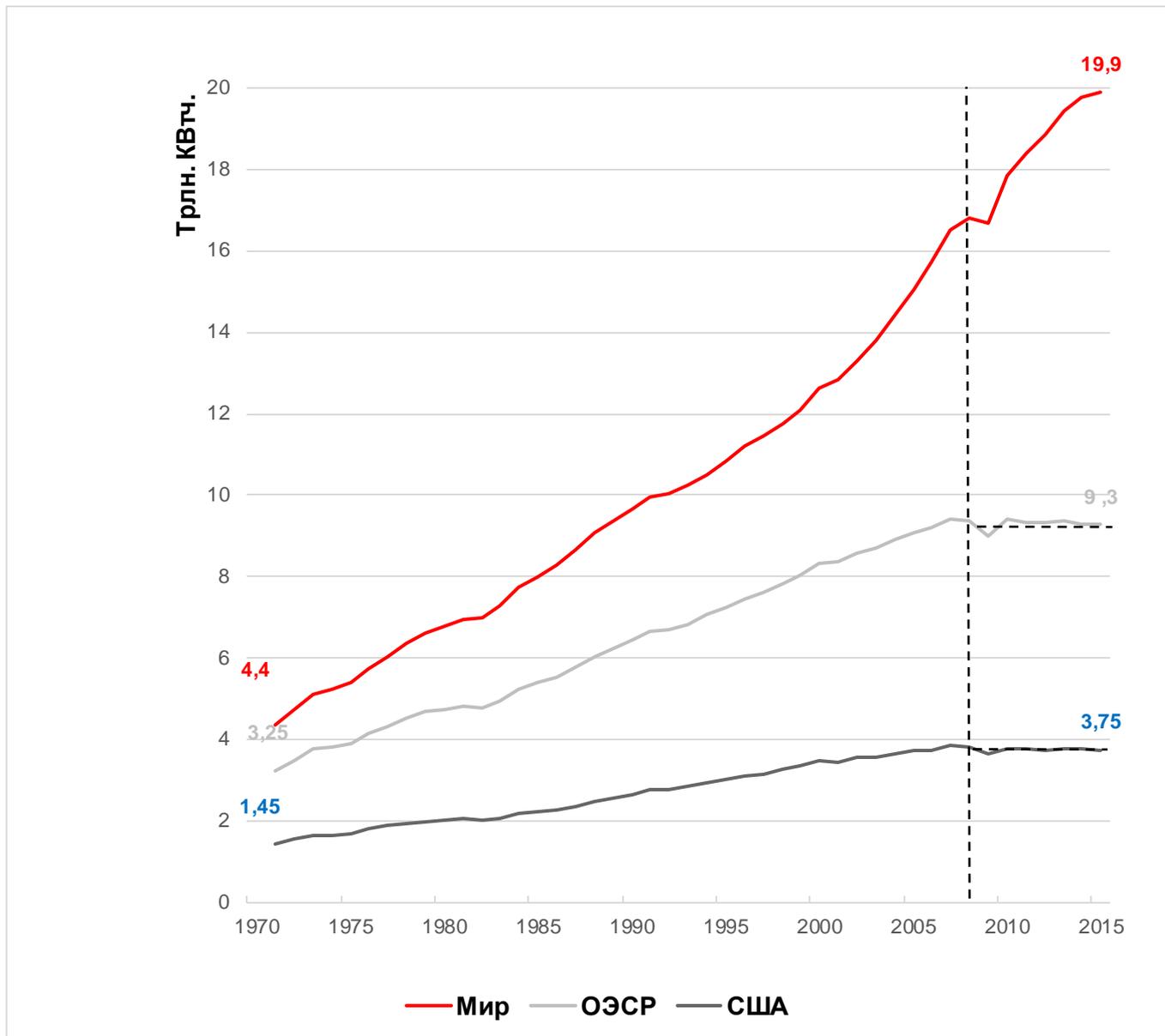
Зависимость стоимости ядерного топлива (в центах США), приходящегося на 1 КВт.ч. электроэнергии, произведенной на АЭС в США в 2014 г., в зависимости от цены природного урана (\$/кг).



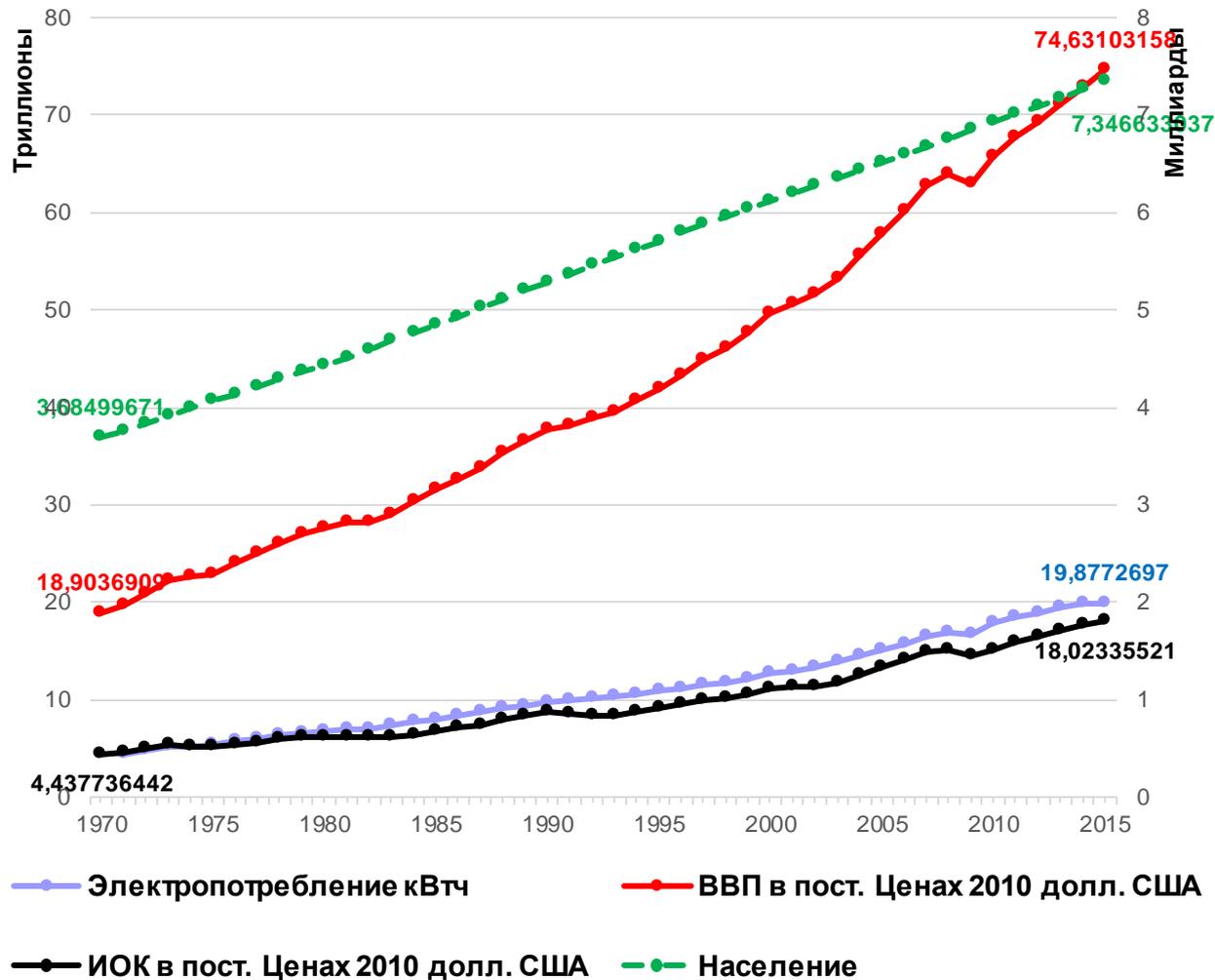


Часть II. Прогнозы мирового электропроизводства на АЭС, установленной мощности энергоблоков АЭС, объём потребления природного урана на период 2015-2050 гг.

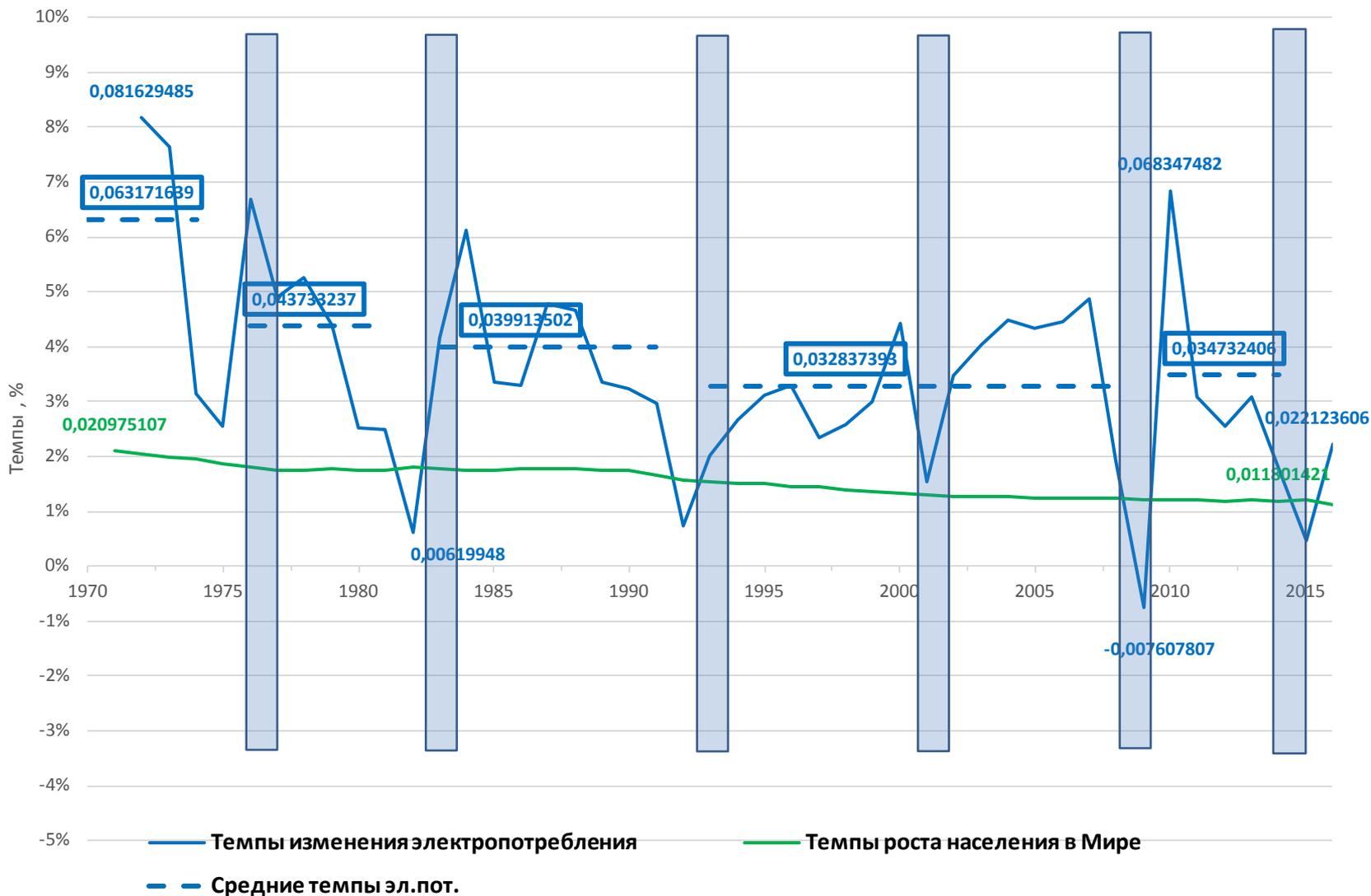
Динамика электропотребления в мире, США и в странах ОЭСР в период 1970-2015 гг.



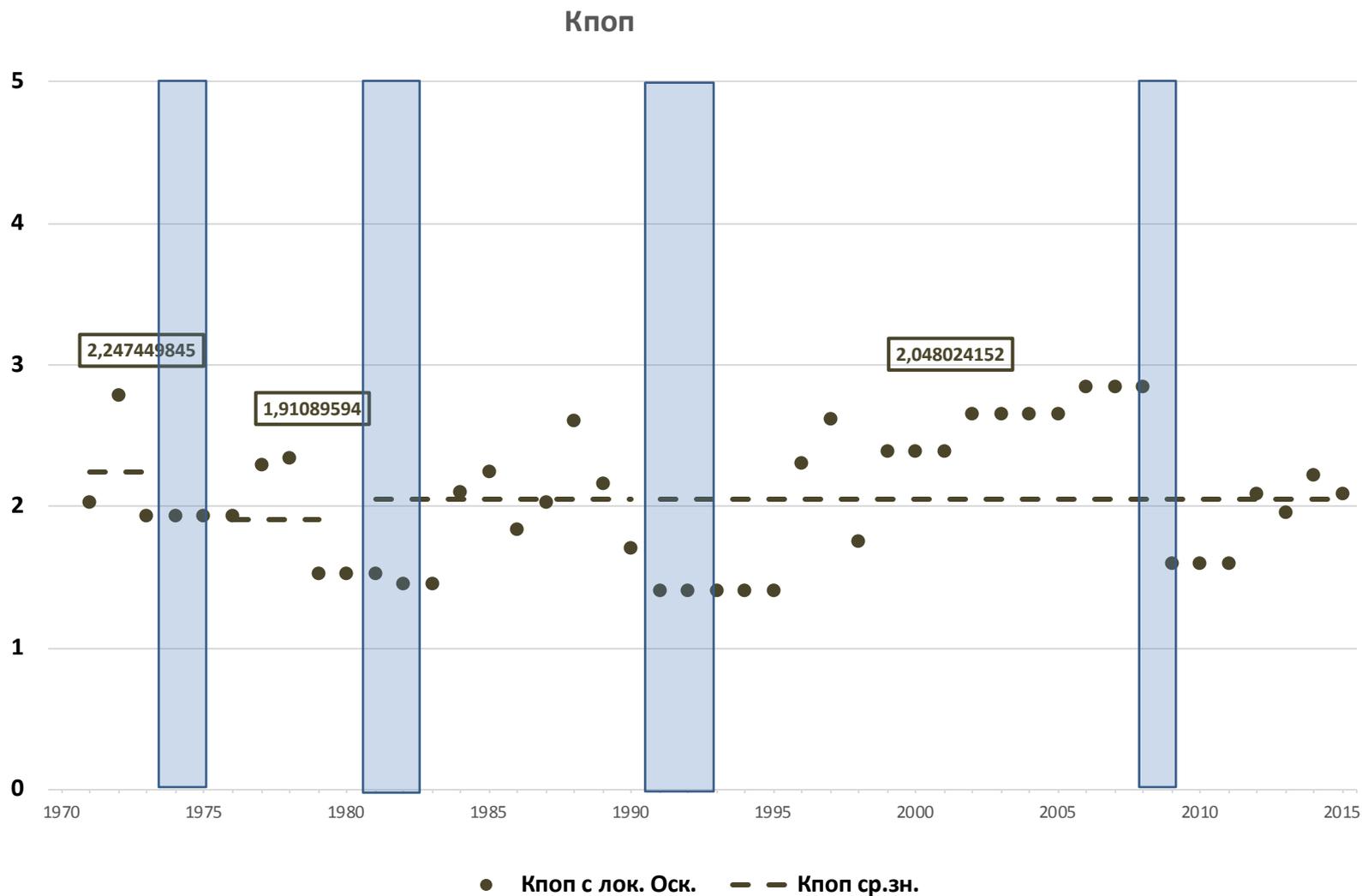
Динамика роста: численности населения Земли (млрд человек), мирового электропотребления (трлн кВт.ч), а также мировых ВВП и инвестиции в основной капитал (ИОК) (в постоянных ценах в \$ 2010г.) в период 1970-2015 гг. (46 лет).



Ежегодные темпы изменения мирового электропотребления и численность населения Земли в период с 1970-2015 гг.



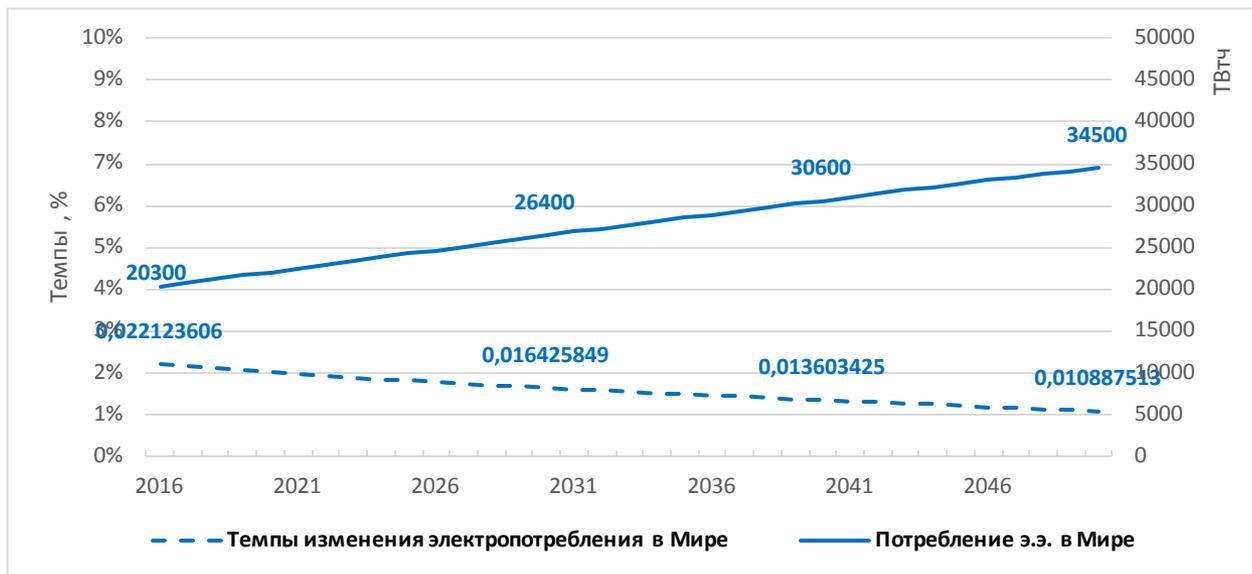
Коэффициент эластичности мирового электропотребления к численности населения Земли в период 1971-2015 г. (с учетом локального осреднения на отрезках времени в 2-4 года).



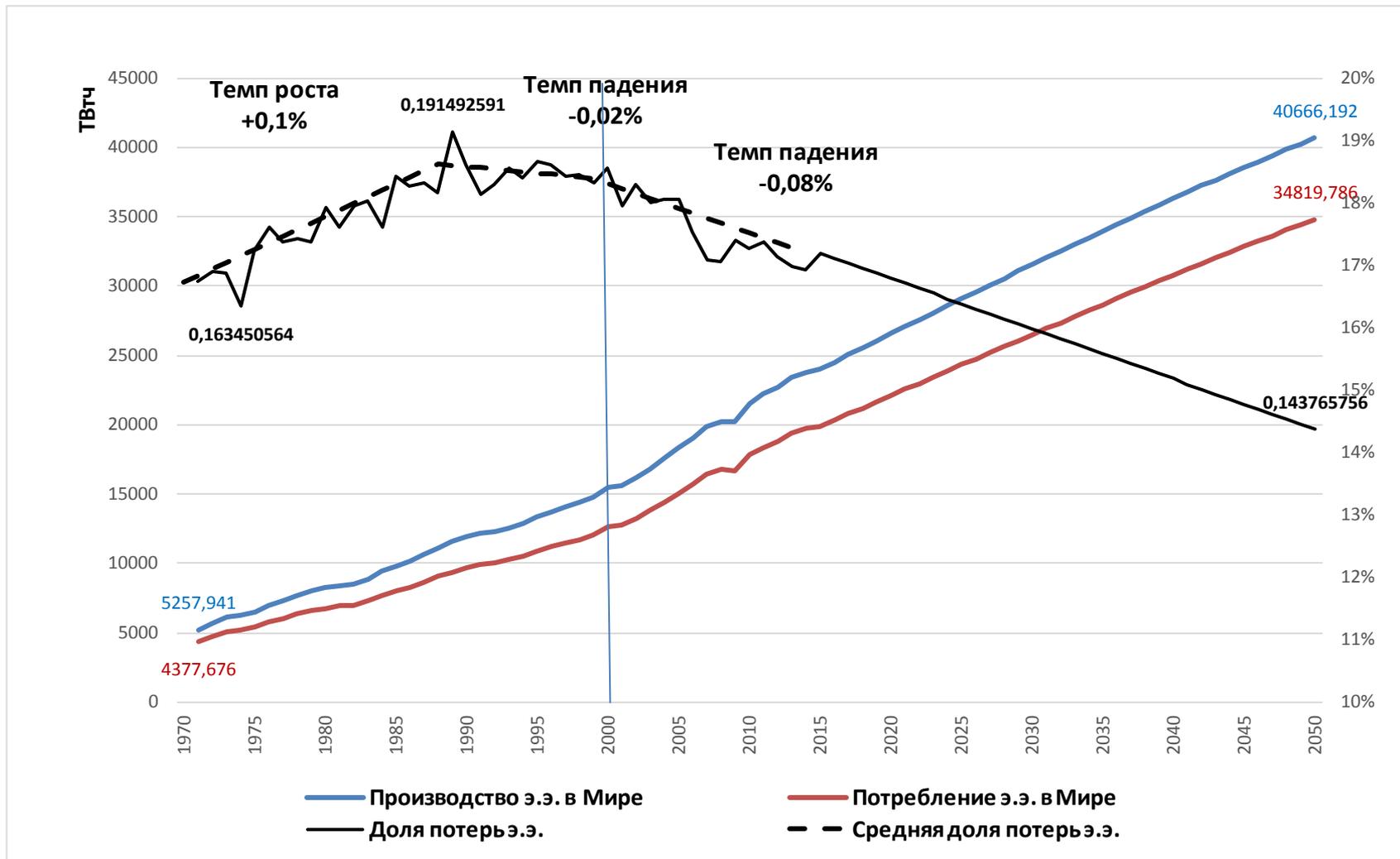
Прогнозы динамики численности населения Земли и соответствующие ей годовые темпы роста в период 2016-2050 гг. по данным UN: World Population Prospects: The 2015 Revision (базовый сценарий).



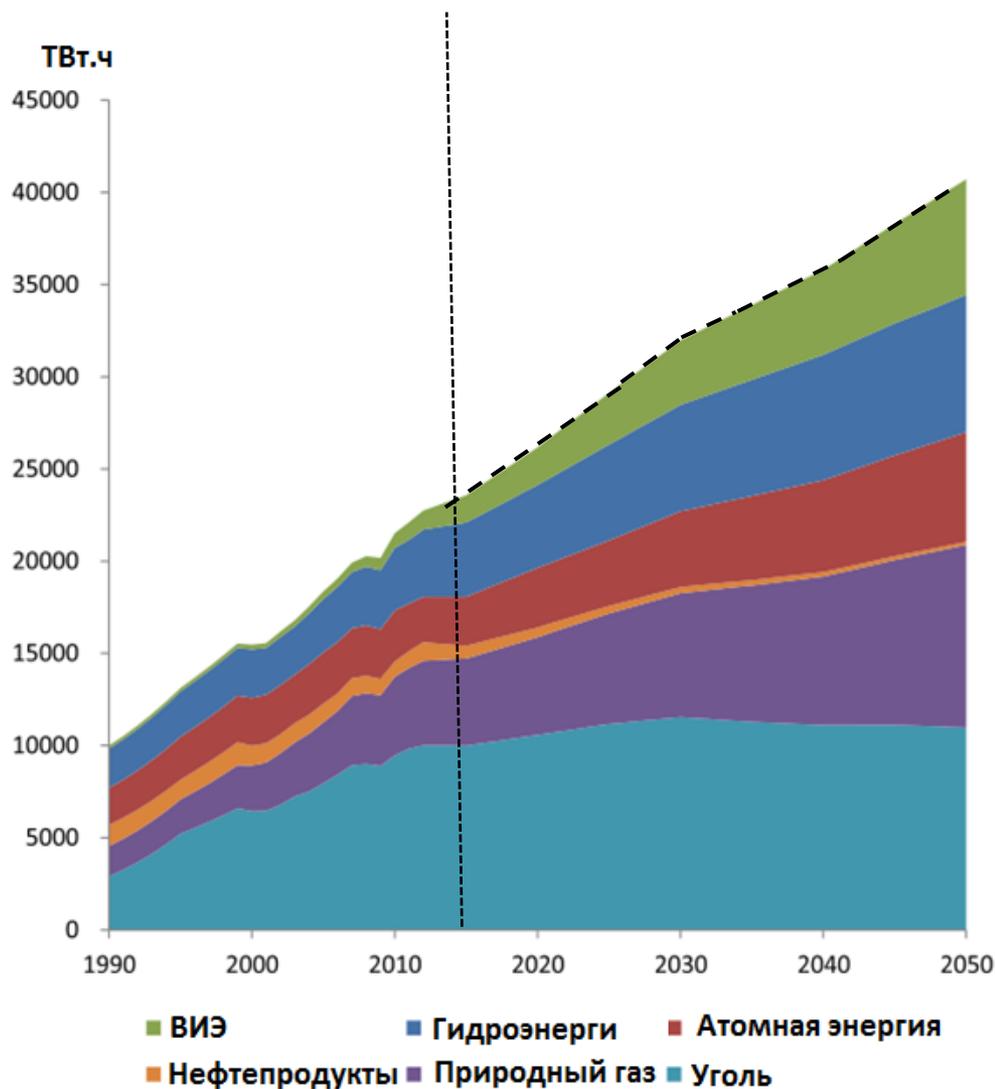
Прогнозы динамики мирового электропотребления и ежегодные темпы роста мирового электропотребления в период 2016-2050 гг.



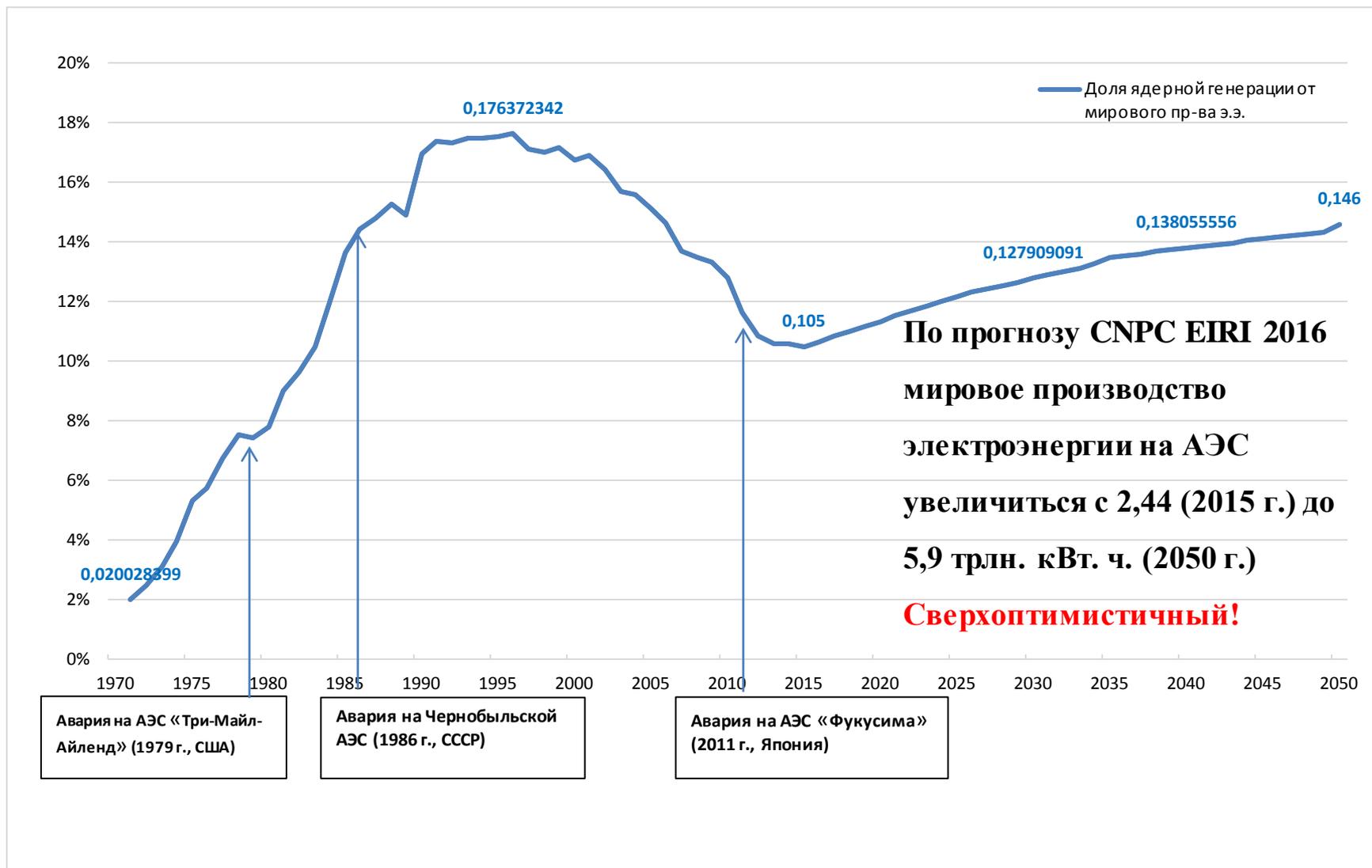
Динамика мирового электропотребления, электропроизводства и потери электроэнергии в период 1970-2015 гг. (факт) и их прогнозные значения в период 2016-2050 гг.



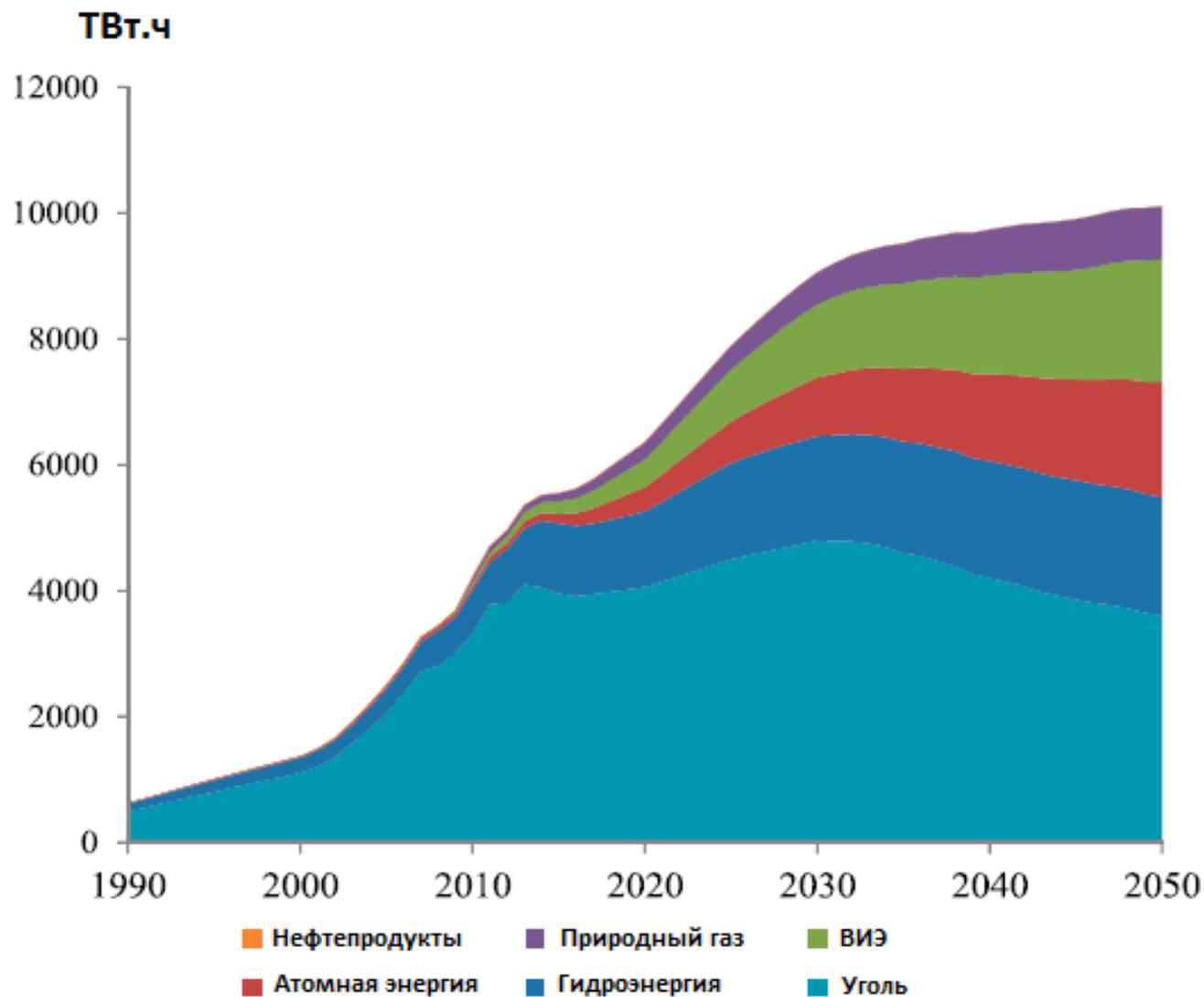
Динамика мирового электропроизводства и его структуры в период 1990-2014 гг. (факт) и их прогнозы в период 2015-2050 гг., по данным настоящей работы (только динамика мирового электропроизводства) и CNPC ETRI 2016.



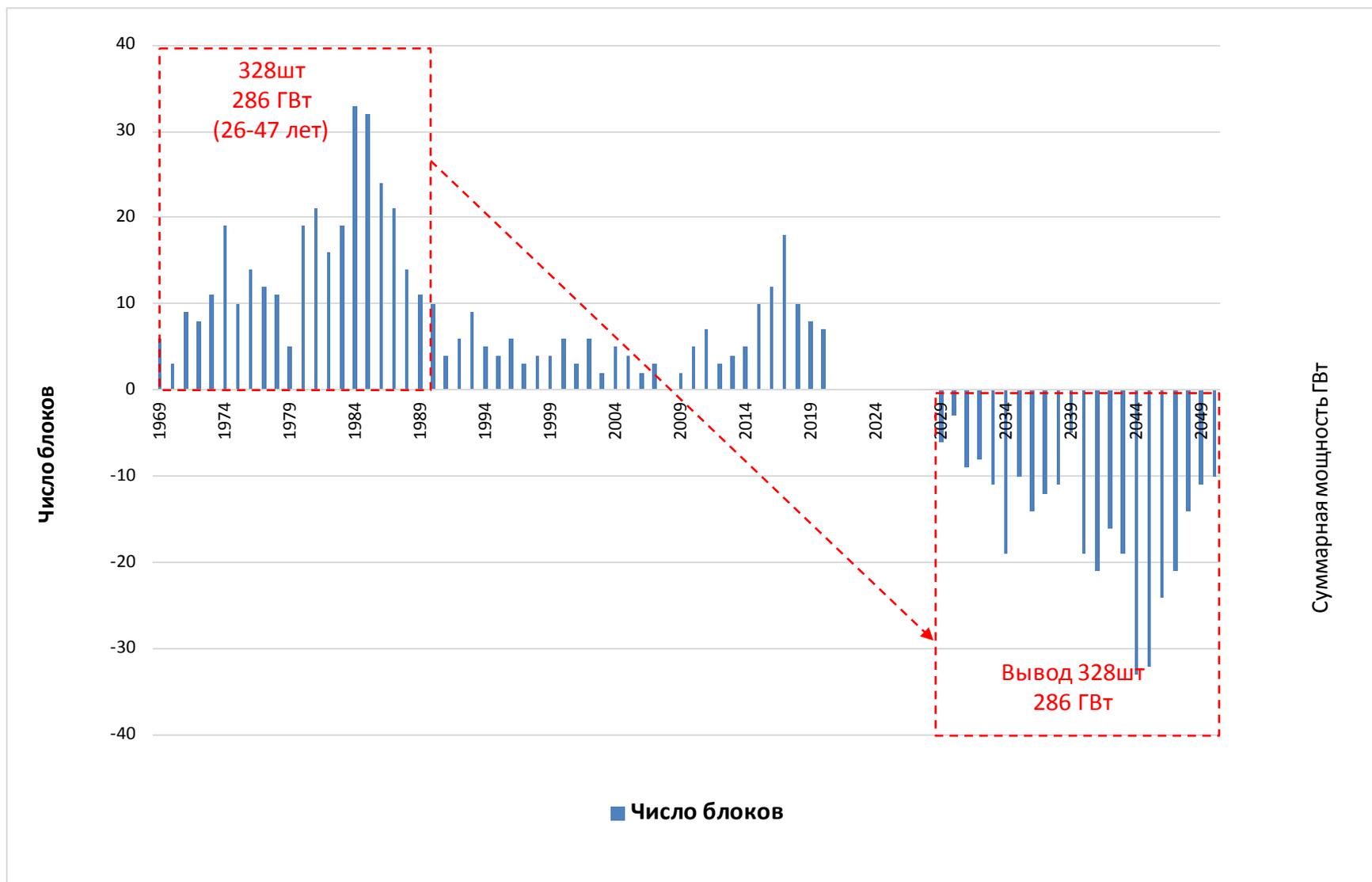
Доля мирового электропроизводства на АЭС в период 1971-2015 гг. и 2016-2050 гг. и прогноз (базовый) по CNPC ETRI 2016.



Динамика и структура электропроизводства в Китае в период 1990-2014 гг. (факт) и в период 2015-2050 гг. (базовый прогноз) по данным CNPC ETRI 2016.



Число энергоблоков, выводимых из эксплуатации, и их суммарная мощность в период 2029-2050 гг.



Список энергоблоков АЭС в мире, запланированных к началу строительства, в период с 2016-2020гг. по данным МАГАТЭ.

	Страна, подрядчик	Название АЭС	Тип реактора	Номинальная мощность ГВт
2016	India, NPCIL	Kudankulam 2	PWR	950
2016	India, NPCIL	Kakrapar 3	PHWR	640
2016	India, Bhaviri	KalpaKkam	FBR	470
2016	Russia, Rosenergoatom	Novovoronezh II-1	PWR	1070
2016	USA, TVA	Watts Bar 2	PWR	1180
2016	China, CNNC	Sanmen 1	PWR	1250
2016	China, SPI	Haiyang 1	PWR	1250
2016	China, CNNC	Changjiang 2	PWR	650
2016	China, CNNC	Fuqing 3	PWR	1080
2016	China, CGN	Fangchenggang 2	PWR	1080
2016	India, NPCIL	Rajasthan 7	PHWR	640
2016	Pakistan, PAEC	Chashma 3	PWR	300
2017	Slovakia, SE	Mochove 3	PWR	440
2017	Russia, Rosenergoatom	Pevек FNPP	PWR x 2	70
2017	Russia, Rosenergoatom	Leningrad II-1	PWR	1070
2017	UAE, ENEC	Barakah 1	PWR	1400
2017	China, CGN	Taishan 1	PWR	1700
2017	China, CGN	Taishan 2	PWR	1700
2017	China, CNNC	Sanmen 2	PWR	1250
2017	China, SPI	Haiyang 2	PWR	1250
2017	China, CGN	Yangjiang 4	PWR	1080
2017	China, CNNC	Fuqing 4	PWR	1080
2017	China, China Huaneng	Shidaowan	HTR	200
2017	China, CNNC	Tianwan 3	PWR	1060
2017	Russia, Rosenergoatom	Rostov 4	PWR	1200
2017	Korea, KHNP	Shin-Kori 4	PWR	1350
2017	Korea, KHNP	Shin-Hanul 1	PWR	1350
2017	India, NPCIL	Kakrapar 4	PHWR	640
2017	India, NPCIL	Rajasthan 8	PHWR	640
2017	Pakistan, PAEC	Chashma 4	PWR	300
2018	Russia, Rosenergoatom	Novovoronezh II-2	PWR	1070
2018	Slovakia, SE	Mochove 4	PWR	440
2018	France, EdF	Flamanville 3	PWR	1600
2018	Finland, TVO	Olkilouto 3	PWR	1720
2018	Korea, KHNP	Shin-Hanul 2	PWR	1350
2018	UAE, ENEC	Barakah 2	PWR	1400
2018	Brazil	Angra 3	PWR	1405
2018	Argentina	Carem25	PWR	27
2018	China, CGN	Yangjiang 5	PWR	1080
2018	China, CNNC	Tianwan 4	PWR	1060
2019	USA, Southern	Vogtle 3	PWR	1200
2019	USA, SCEG	Summer 2	PWR	1200
2019	UAE, ENEC	Barakah 3	PWR	1400
2019	China, CGN	Fangchenggang 3	PWR	1150
2019	China, CGN	Hongyanhe 5	PWR	1120
2019	China, CGN	Yangjiang 6	PWR	1080
2019	China, CNNC	Fuqing 5	PWR	1150
2019	Romania, SNN	Cemavoda 3	PHWR	720
2020	Russia, Rosenergoatom	Leningrad II-2	PWR	1070
2020	China, CGN	Hongyanhe 6	PWR	1120
2020	China, CGN	Ningde 5	PWR	1150
2020	China, CGN	Fangchenggang 4	PWR	1150
2020	China, CNNC	Fuqing 6	PWR	1150
2020	UAE, ENEC	Barakah 4	PWR	1400
2020	Romania, SNN	Cemavoda 4	PHWR	720
Всего блоков, шт.	56	Общая мощность, ГВт		56,3

Мощности строящихся энергоблоков АЭС в мире (без Китая) и в Китае составляет пропорцию: **54/46**.

В сценарных условиях прогноза роста суммарной мощности энергоблоков АЭС, подключаемых к сети, в период 2016-2050 гг., **учитываются:**

- мощность энергоблоков АЭС по годам, достигших предельного срока 60 лет, которые должны быть выведены из эксплуатации в период 2016-2050 гг. Суммарная мощность таких энергоблоков составляет **286 ГВт** к 2050 г.
- мощность энергоблоков АЭС, подключаемых к сети в Китае, по годам в период 2016-2050 гг., принимается в соответствии с базовым прогнозом электропроизводства на АЭС в этой стране по данным CNPC ETRI 2016 и прогнозу средневзвешенного КИУМ АЭС Китая:
 - ✓ установленной мощности АЭС в Китае **246 ГВт** в 2050 г.
 - ✓ с суммарной выработкой электроэнергии **1,81 трлн. кВт ч**, при КИУМ 84% в 2050 г.

- Ненулевая вероятность очередной тяжёлой аварии на АЭС в мире.
- Ограниченное развитие атомной энергетики в мире (вне Китая), из-за:
 - ✓ отсутствия роста электропотребления в развитых странах;
 - ✓ ограниченных инвестиционных возможностей в развивающихся странах;
 - ✓ конкуренции ВИЭ и ТЭС на природном газе, из-за прогнозируемой долговременной низкой цены газа, постфукусимского синдрома;
 - ✓ ограничения мощностей по производству энергетического оборудования для АЭС в Китае, Ю.Кореи и России – основных стран-экспортёров АЭС.

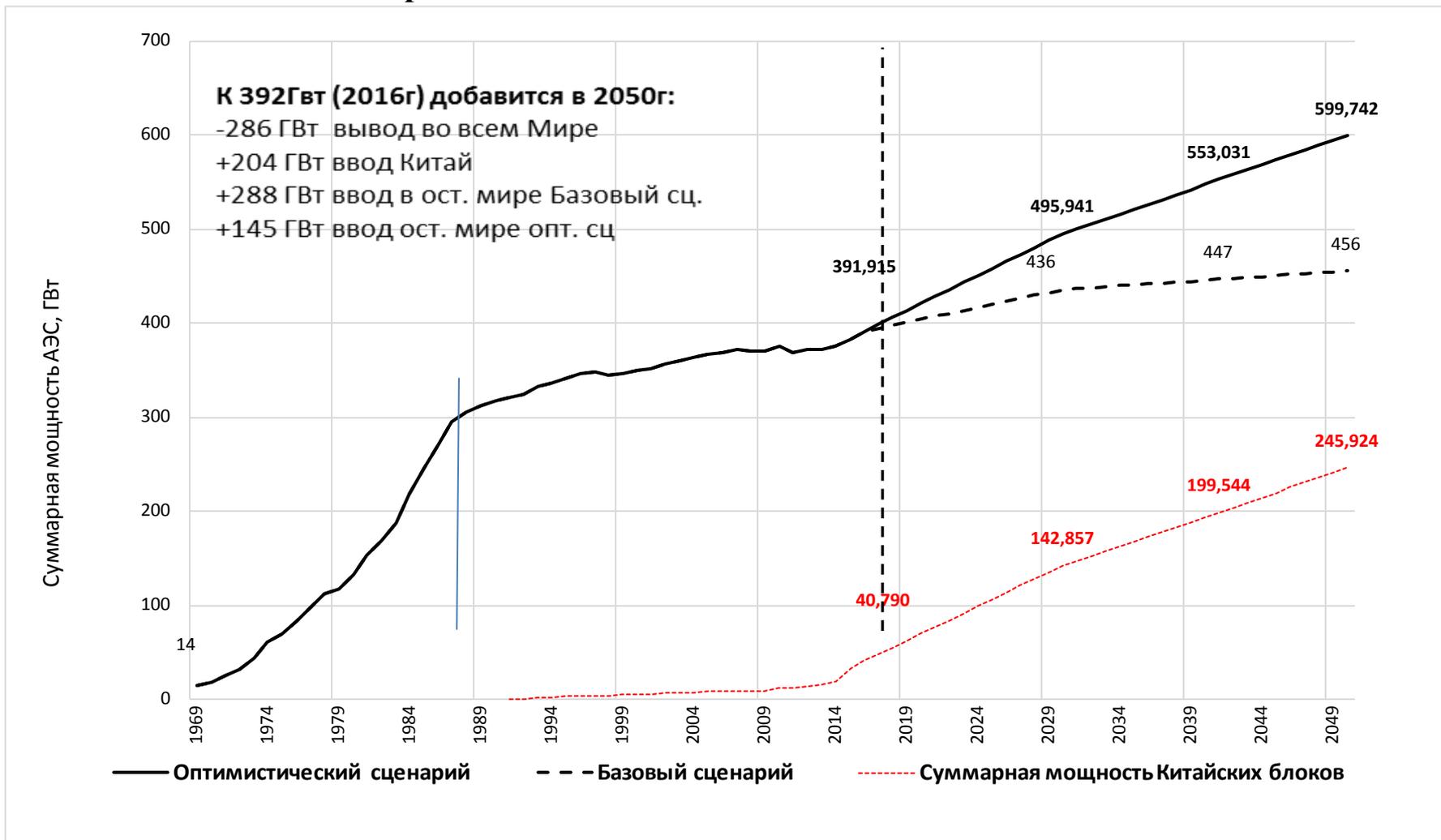
Два сценария

- **Оптимистический:** предполагается, что суммарная установленная мощность энергоблоков АЭС, подключаемых к сети в мире (кроме Китая) и аналогичная мощность в Китае, по годам в период 2021-2050 гг. будет соответствовать пропорции **54/46**.

Это значит, что в мире по годам эта мощность будет составлять **117%** от аналогичной мощности в Китае, или **288 ГВт** в 2050 г.

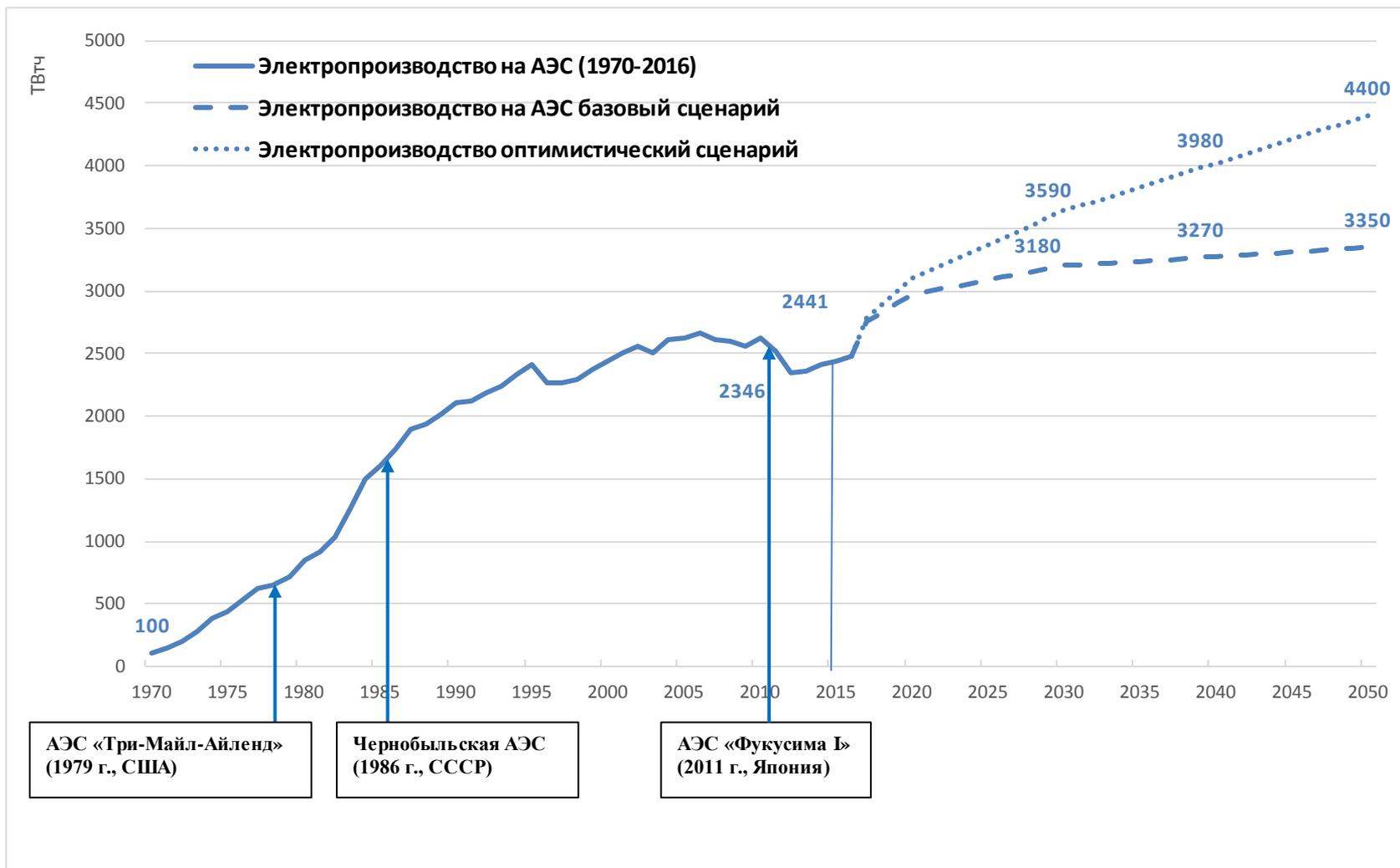
- **Базовый:** предполагается, что суммарная установленная мощность энергоблоков АЭС, подключаемых к сети в мире (кроме Китая), в период 2021-2050 гг. равняется **59%** = $117\% / 2$ от аналогичной мощности в Китае, или **145 ГВт** в 2050 гг.

Рост суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС в мире и отдельно в Китае на период 1969-2015 гг. (факт.) и в период 2016-2050 гг., в соответствии базовым и оптимистичным прогнозами настоящей работы и прогноз роста суммарной установленной мощности АЭС в Китае рассчитанный по данным CNPC ETRI 2016

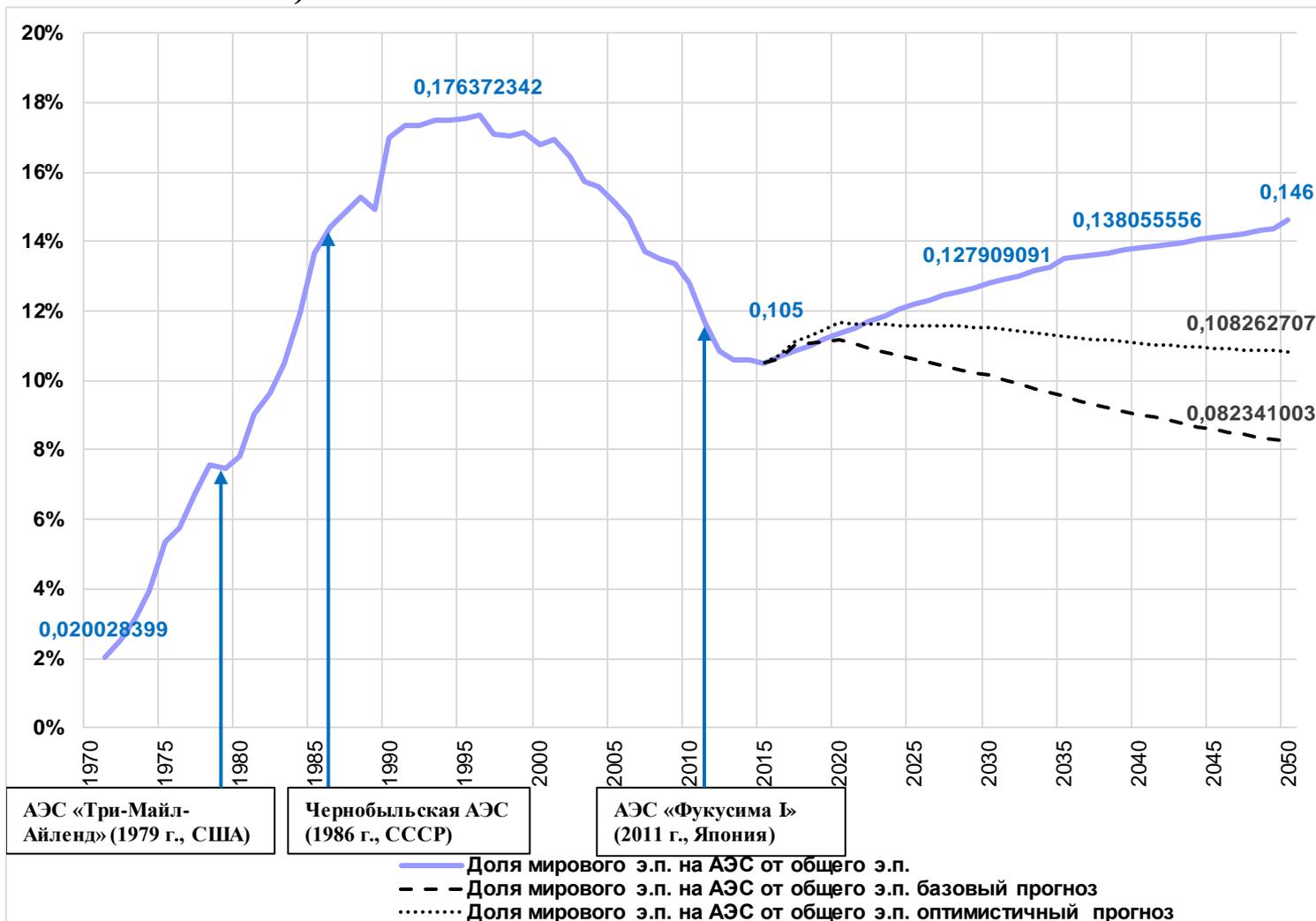


- По оптимистическому сценарию темп роста суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС в мире увеличится приблизительно в 3 раза по отношению к базовому и в 2050 г. эта мощность будет равняться **600 ГВт** и по сравнению с 2015 г. вырастет на **53%**.
- По базовому сценарию рост суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС в мире будет равняться **456 ГВт**. При этом в Китае, в период 2016-2050 гг. эта мощность вырастет с 41 ГВт до **246 ГВт** или в **6 раз**.

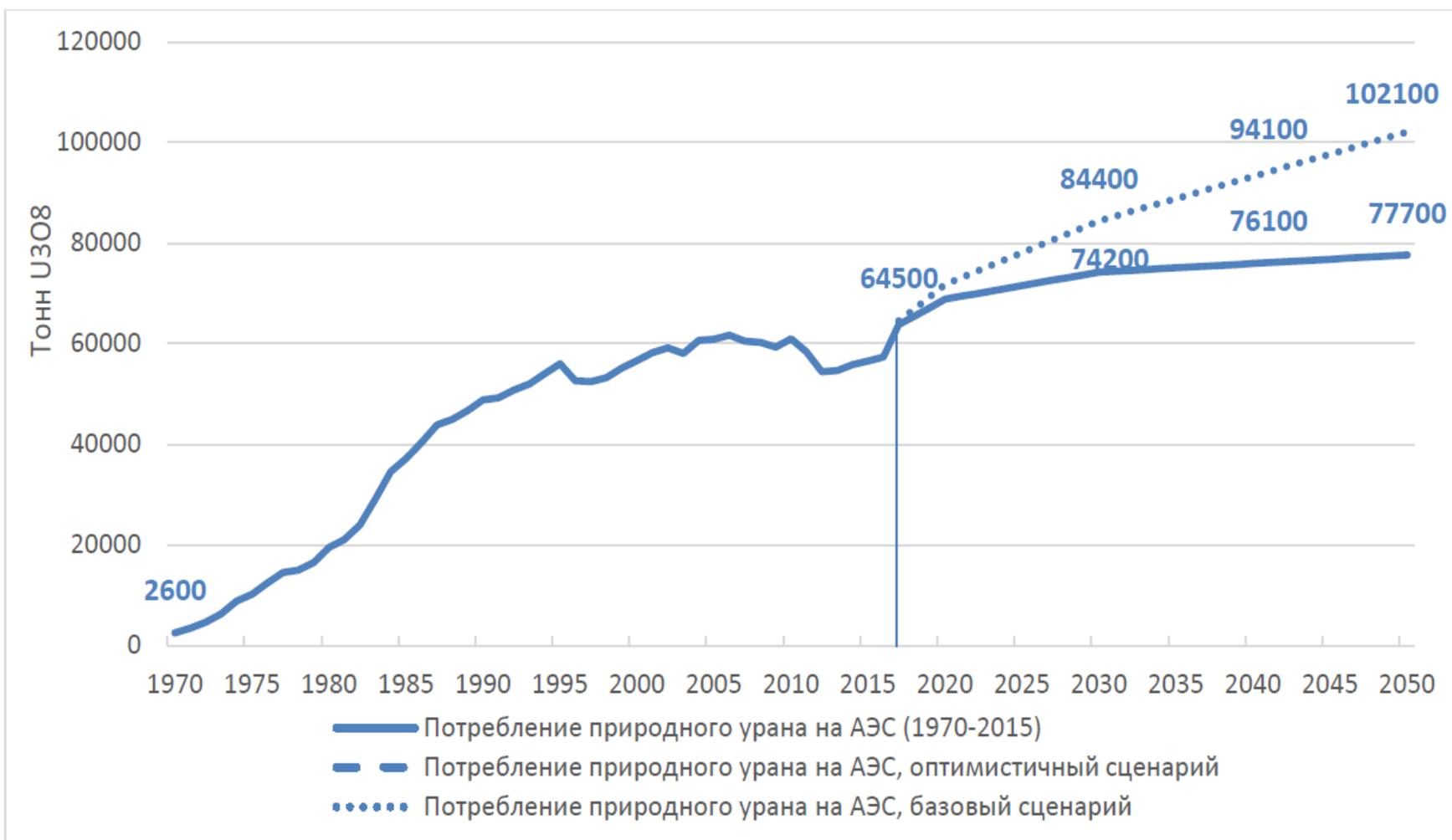
Динамика мирового электропроизводства на АЭС в период 1970-2015 гг. (факт, по данным Enerdata) и прогнозы (базовый и оптимистический), рассчитанные по данным настоящей работы.



Доля мирового электропроизводства на АЭС от общего объема электропроизводства в мире в период 1971-2015 гг. и в период 2016-2050 гг. (прогнозы) по CNPC ETRI 2016 (базовый) и данным настоящей работы (базовый и оптимистичный).



Динамика потребления природного урана, соответствующая динамике мирового электропроизводства на АЭС в период 1970-2015 гг. (факт), и прогноз в период 2016-2050 гг., в соответствии с базовым и оптимистичным прогнозами настоящей работы.



- на **63 года** с себестоимостью добычи менее \$130/кгU
- на **82 года**, с себестоимостью добычи менее \$260/кгU.

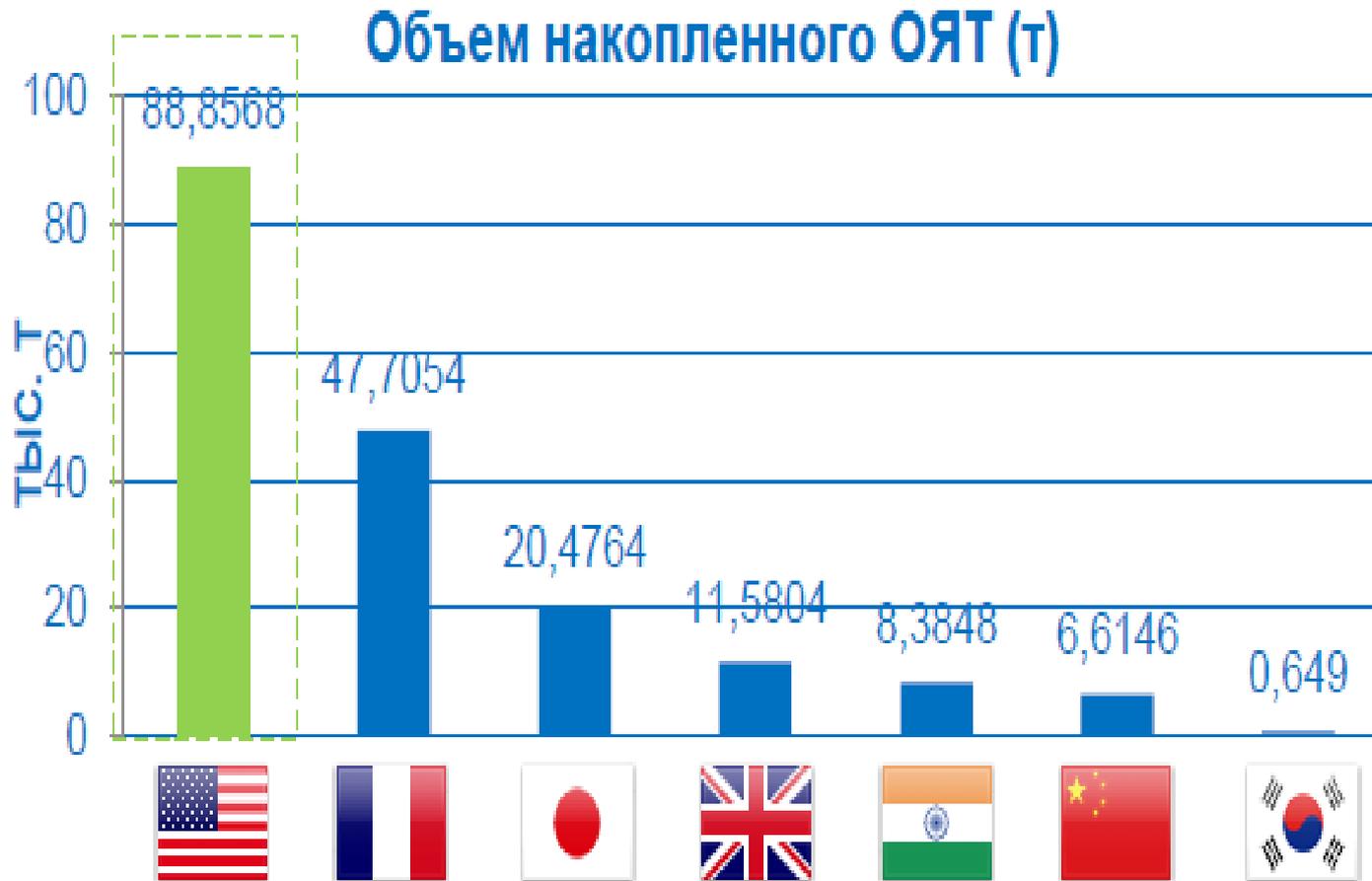


Дополнительные материалы



Часть III. Ядерные топливные циклы в атомной энергетике.

Объемы накопленного ОЯТ в тыс. тонн в различных странах на начало 2014 г.



США и Францию приходится около 137 тыс. тонн ОЯТ или более половины из общего объёма ОЯТ, накопленного в мире.

Замкнутый ядерный топливный цикл с реактором на быстрых нейтронах, со свинцовым теплоносителем (Проект Росатома «Прорыв»)

- Так, **не отработаны** на экспериментальных стендах конструкция РУ БРЕСТ ОД-300 и ее основные элементы: ГЦНА, ПГ, системы перегрузки, система технологии свинцового теплоносителя, корпус реактора из железобетона, простые ТВС и ТВС с рабочим органом СУЗ и т.д.
- Ядерное топливо, имеющее аббревиатуру для СНУП (смешанное нитридное уран-плутониевое), **принято** без необходимой расчётно-экспериментальной отработки. **Декларированы** его энерговыработка и **среднее** выгорание выгружаемого топлива около **12%** тяжелых атомов (т.а.), а значит максимальное в 1,5 раза выше, что примерно **в 3 раза превышает** достигнутый уровень. **Отсутствует** подтверждение показателей надёжности топлива. Единичные экспериментальные результаты **не выводят** на показатели вероятности отказа меньше, чем **10^{-6}** . При этом **назначение** такого высокого уровня выгорания для СНУП обусловлено только соображениями экономического обоснования энергоблока. Однако такой уровень выгорания, пока не достигнут и вряд ли будет достигнут, исходя из экспериментальных данных 70-80-х годов прошлого столетия.

- Конкуренентоспособность энергоблока БРЕСТ ОД-300 **не обоснована** расчетами реальной экономики, а **назначена** из необходимости обеспечения конкурентоспособности. После чего немедленно следует вывод о конкурентоспособности промышленного энергокомплекса, что является **экономическим мифом**.
- Разработчики «ПРОРЫВа» объявили «вне закона» МОХ-топливо. Даже если принять все остальные постулаты, то в условиях двухкомпонентной атомной энергетики (одновременное существование БР и ВВЭР) придётся создавать параллельные производства МОХ и СНУП, что неминуемо приведёт к повышению их удельной стоимости.

Химера СНУПа родилась из-за стремления получить равновесную активную зону с запасом реактивности меньше доли запаздывающих нейтронов β (т.е. $< \beta$), из-за стремления исключить теоретическую возможность разгона реактора на мгновенных нейтронах. Не получилось, запас реактивности в БРЕСТе больше β . Тогда вся эта история со СНУП теряет всякий физический смысл.

- Начато строительство опытно-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК) в АО «СХК» (г. Северск), основным объектом которого является реактор БРЕСТ ОД-300. В этом проекте отсутствует всякое международное участие и, соответственно, **независимая** от Росатома экспертиза. Пуск модуля фабрикации топлива (МФТ) – 2018 г., в то время как пуск БРЕСТа – не ранее 2025 г., конечно, если вообще состоится. Объект МФТ станет памятником, если его немедленно не перепрофилировать. Кстати, уже имеются предложения восстановить первоначальные сроки сооружения МФТ - 2020г. При этом, по-прежнему, нет задачи для него, кроме выпуска стартовой активной зоны для БРЕСТ-ОД-300. Потом его работа будет сопровождаться продолжительными паузами, конечно, при условии, что в 2025 г. будет все-таки пущен БРЕСТ-ОД-300, что абсолютно неочевидно.

За счёт каких средств собираются содержать МФТ? Ничего в проекте и в программе не предусмотрено. Это значит, что вместо финансирования работ по повышению конкурентоспособности АЭС с ВВЭР, что **сегодня является главной задачей Росатома в гражданской атомной энергетике**, финансовые ресурсы тратятся на никому ненужное строительство МФТ.

- Отсутствует нормативная база для БРЕСТ, поэтому лицензировать его на соответствие нормативной базе невозможно. О необходимости создания нормативной базы говорится, но результатов пока нет.
- При разработке замкнутого топливного цикла с каким-либо типом ядерного реактора, **всегда** следует оценивать, начнут ли при его внедрении снижаться объёмы накопленного ОЯТ. Без решения проблемы переработки и рециклирования уже существующего ОЯТ все "прорывные" реакторные технологии не стоят даже той бумаги, на которой их рисуют.

- Актуальность ЗЯТЦ с БР для российской сравнительно небольшой атомной генерации сильно преувеличена, эта проблема куда острее стоит в США и Франции, на которых приходится около половины ОЯТ, но там никто не бросается, очертя голову, в «Прорыв».
- Инициаторы этого сверх всякой меры распиаренного проекта, любят сравнивать «Прорыв» с атомным проектом СССР. Есть в этом некое циничное навязывание обществу сомнительных идей, будто для него свинцовый БРЕСТ - эквивалент национальной безопасности и независимости страны.

Примеры неудачных, разорительных проектов в советской и российской электроэнергетике

- Вспомним каскад огромных водохранилищ и ГЭС на равнинных Волге и Каме, построенных в 50-60 гг. прошлого века. Помимо гигантских затрат, сколько ударов по природе и плодородным земельным ресурсам европейской части страны.
- Или модульный ядерный реактор с чрезвычайно ядовитым теплоносителем тетраоксид диазота (N_2O_4) - любимое детище тогдашнего руководства Минсредмаша СССР – огромные деньги и 20 лет (1965-1985 гг.) потрачено на тупиковое направление. В то же время крайне мало уделялось внимания на НИОКРы и по физике, и по обоснованию безопасности реакторов РБМК – одного из двух главных направлений развития советской атомной энергетики, результат авария на 4-м блоке Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г.

- Вспомним эпопею с МГД-энергетикой, когда МГД-генератор проектировался и испытывался на двух установках У-02 на Болотной набережной и У-25 на Дмитровском шоссе. Такой генератор МГДС-500 должен был быть установлен на Рязанской ГРЭС в 1980 г. Но все потерпело фиаско. Не помог и американский супермагнит для У-25.
- Если бы эти деньги и усилия ученых, инженеров и рабочих были потрачены на развитие крупных газовых турбин для ТЭС, мы сейчас не закупали бы их за границей десятками штук. На тот момент, когда силы время и деньги были брошены на МГД-генератор (1970-80-е гг.), по газовым турбинам мы были еще впереди всей планеты. У нас была самая современная и самая мощная газовая турбина ГТ-100 на мощность 100 МВт (их изготовил ЛМЗ в количестве 6 штук).

Перспективы разработок БР с ЗЯТЦ в США

- В первую очередь здесь будет уместно привести выводы Комиссии «голубой ленты» по ядерному будущему Америки
- «Ни одна из существующих сегодня или могущих быть реализованной в разумные сроки разработок реакторов или технологий ЯТЦ (в том числе современные технологии переработки и рецикла) не способна фундаментально изменить состояние проблемы обращения с РАО, которая встает перед нашей страной минимум на несколько следующих десятилетий, если не больше».
- «Наш вывод как группы состоит в следующем: на данном этапе для США преждевременно делать в государственной политике необратимый выбор в пользу какого-либо конкретного варианта ЯТЦ».

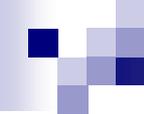
Перспективы разработок БН с ЗЯТЦ в Китае

- Первый этап – 1996-2015 гг. создание исследовательского реактора CEFR тепловой мощностью около 65 МВт / **25 МВт** (эл). Физический пуск был осуществлен 21.07.2011 г., энергетический пуск - 19.10.2015 г. Построен при техническом содействии РФ.
- Второй этап – 2011-2020 гг. создание демонстрационного реактора CFR-600 тепловой мощностью 1500 МВт / **600 МВт** (эл). Планируется закончить предварительный проект CFR -600 до конца 2016 г. и рабочий проект в 2017-2018 гг. В 2015 г. начата работа по проектированию и НИОКР по основному оборудованию РУ: насосов 1 и 2 контуров; промежуточных теплообменникам; исполнительным механизмам СУЗ; элеваторам загрузки-выгрузки ТВС; механизму перегрузки ТВС; парогенератору; приборам натриевой технологии (расходомеры, уровнемеры и др.). Китайская сторона предлагает сотрудничество в проектировании и изготовлении вышеуказанного оборудования.

- Третий этап – 2015-2050 гг. создание коммерческого реактора CFR электрической мощностью 1200 МВт. Предполагается осуществление коммерциализации реакторов типа БН, воспроизводство ядерного топлива в промышленном масштабе и выход на серийное производство ЗЯТЦ с БН. В 2015-2016 гг. начались работы над предварительной концепцией РУ CFR 1200. Ведутся работы по обоснованию параметров РУ, конструкции основного оборудования, расчеты по активной зоне. Привлечение к работе проектировщиков АЭС, систем и оборудования планируется после 2016 г.

Развитие ЗЯТЦ с БР со свинцовым теплоносителем, в Китае

- Программа по развитию ЗЯТЦ с БР со свинцовым теплоносителем рассчитана примерно на 20 лет (до 2030-х г.). Она также состоит из **последовательного** выполнения трех этапов: на первом этапе предполагается построить исследовательский реактор тепловой мощностью около **10 МВт**, на втором - демонстрационный реактор мощностью около **100 МВт**, и только на третьем этапе – прототип коммерческого реактора мощностью около **1000 МВт**. Именно такой подход предлагали многочисленные эксперты при формировании проекта «Прорыв». Но его руководители хотят «прыгнуть через пропасть» ни как не подготовившись. А ведь стоит вопрос: *«Стоит ли вообще прыгать?!»* Для справки, в проекте «Прорыв» поставлена задача **сразу** построить реактор БРЕСТ-ОД-300 тепловой мощностью **700 МВт**.



На этой конференции («ТРАВЭК») я задал вопрос Е.О. Адамову:

«Кому и как будет продаваться технология АЭС с реактором БН, если такая продажа нарушает режим нераспространения ядерных материалов и технологий в страны, не обладающие ядерным оружием?»