

ВЗАИМОСВЯЗЬ ВОЕННОГО И ГРАЖДАНСКОГО ЦИКЛОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В РОССИИ

Олег Бухарин

В статье описывается близкое соединение военного и гражданского циклов ядерного топлива в России. Отдельные обрабатывающие предприятия и поток ядерного материала представлены в том виде, как они существовали в 80-х годах и как существуют сейчас. Окончание холодной войны и распад Советского Союза ослабили связь между двумя циклами ядерного топлива, но не разделили их. Отделение гражданского цикла ядерного топлива от военного способствовало бы интеграции России в мировой цикл ядерного топлива и ее участию в международных режимах нераспространения.

Автор - приглашенный исследователь в Центре изучения энергетики и окружающей среды при Принстонском университете, Принстон, Нью Джерси, США.

ВВЕДЕНИЕ

В России военный и гражданский циклы ядерного топлива тесно взаимосвязаны. Такая связь служит помехой для ядерного комплекса, российской и международной общественности по ряду причин. Во-первых, это крупное препятствие к введению управления западного типа и к разворачиванию коммерческой деятельности в промышленности. Во-вторых, она увеличивает общественное недоверие к ядерному комплексу из-за возрастающей секретности. В третьих, она замедляет западное сотрудничество и осуществление запрета на производство расщепляющихся материалов для производства оружия¹.

Корни взаимосвязи военного и гражданского циклов ядерного топлива лежат в истории ядерного комплекса и в централизованной плановой экономике, с которой Россия жила более 70 лет. Советская ядерная программа была начата в конце 40-х годов как массивная, хорошо скоординированная и избыточная попытка создать ядерное оружие. Программа ядерной энергетики была начата через двадцать лет теми же организациями, которые отвечали за производство ядерного оружия. Таким образом, гражданская ядерная энергия развивалась на основе военного цикла ядерного топлива, а гражданский и военный топливные циклы оказались объединенными на уровне как потоков урана, так и отдельных предприятий². Иными словами, уран по заведенному порядку перемещался между двумя топливными циклами, а многие предприятия были вовлечены как в военную, так и в гражданскую деятельность. Мы изучим два эти уровня взаимосвязи в дальнейшем.

ПОТОКИ УРАНА

Потоки урана в 80-х годах

На рис. 1 показаны потоки естественного, низкообогащенного и высокообогащенного урана в советском ядерном комплексе в 80-х гг. - в период его расцвета.

Фактически весь уран, добываемый в СССР и в Восточной Европе, перевозился на металлургический завод в Глазове для заключительной очистки и превращения в металл. Из металлических слитков на заводе по производству топлива в Новосибирске изготавливали покрытые алюминием топливные элементы (из естественного урана) для реакторов по производству плутония. После облучения в реакторах на производственных площадках в объединении "Маяк" (Челябинск-65), Томске-7 и Красноярске-26 топливо поступало на перерабатывающие заводы, находящиеся вблизи реакторов в Томске-7 и Красноярске-26³. Извлеченный из облученного топлива плутоний передавался на программу ядерного оружия. Оставшийся уран превращался в гексафторид на предприятиях в Ангарске и Томске-7 и обога-

щался до разных уровней на центрифугах, находившихся на заводах в Томске-7, Верх-Нейвинске, Красноярске-45 и Ангарске.

Гексафторид низкообогащенного урана превращался в порошок и гранулы окиси урана для реакторов ВВЭР и РБМК на предприятии по производству топлива в Усть-Каменогорске. Затем на установках по производству топлива в Электростали (ВВЭР-440 и РБМК) и Новосибирске (ВВЭР-1000) из гранул изготовлялись топливные стержни и сборки. Облученное топливо от реакторов ВВЭР-1000 и РБМК помещалось в хранилище⁴, а топливо от реакторов ВВЭР-440 перерабатывалось на "Маяке" вместе с топливом от исследовательских и корабельных реакторов, а также от реакторов на быстрых нейтронах. Извлеченный плутоний реакторного качества хранился на "Маяке", а переработанный уран (в виде уранилнитрата) отсылался в Усть-Каменогорск для изготовления топлива для реакторов РБМК (получение топлива для РБМК из переработанного урана производилось на опытных установках в период 1981-92 гг. и никогда не достигало уровня коммерческого использования⁵).

Поток естественного и низкообогащенного урана был тесно связан с потоком высокообогащенного урана (ВОУ). Большая часть ВОУ производилась из облученного естественного уранового топлива реакторов для производства плутония. Часть ВОУ использовалась в ядерном оружии, а из другой части изготовлялось топливо для корабельных и исследовательских реакторов⁶. Остальное посылалось на завод в Новосибирске, чтобы изготовить стержни для реакторов по производству плутония и решетку для двух реакторов на "Маяке", производящих тритий⁷. ВОУ-топливо, выгоревшее на 75%, перерабатывалось на "Маяке" и из возвращенного урана (со степенью обогащения 50%) на топливном заводе в Электростали изготовлялось топливо для корабельных реакторов⁸. Облученное топливо от корабельных реакторов возвращалось на "Маяк", где перерабатывалось вместе с облученным топливом от ВВЭР-440 и других реакторов (как уже отмечалось выше).

Потоки урана в начале 90-х годов

До некоторой степени приведенное выше описание потоков урана в 80-х годах сохраняется и сейчас. Впрочем, есть некоторые заметные отличия (см. рис.2).

Поступление урана в российский ядерный комплекс истощается из-за прекращения добычи урана в странах Восточной Европы (или ее переориентации на внутренние потребности), распада советского комплекса по получению урана и появления отдельных производителей, ориентированных на рынок. Министерство атомной энергии Российской Федерации (Минатом) реагировало на эти изменения возросшими расчетами на новые источники урана, в

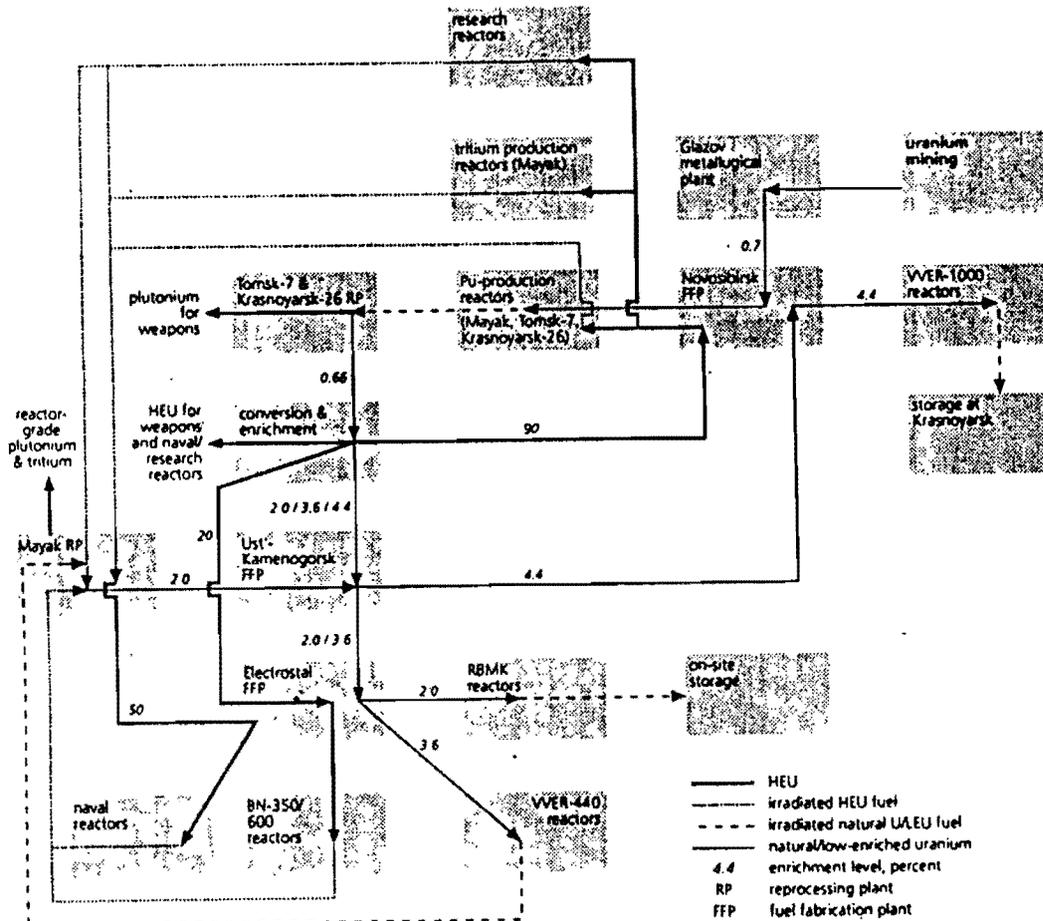


Рисунок 1
Основные потоки урана в 1980-х годах

число которых входят огромные запасы естественного и переработанного урана и урана, возвращаемого из отходов при обогащении (см. приложение)⁹.

Урановые потоки изменились также благодаря заметным сокращениям заказов на оборону, которые происходили с конца 80-х годов. Число реакторов по производству плутония сократилось с 13 в 1987 г. до трех в настоящее время¹⁰. В предположении, что реактор по производству плутония с тепловой мощностью 2000 МВт потребляет 1200 тонн урана в год, закрытие этих реакторов сокращает потребности в естественном уране для них от почти 15000 тонн до 3600 тонн¹¹. Потребности в уране для изготовленных в СССР коммерческих энергетических реакторов составляет примерно 7000 тонн урана в год, но всего лишь 750 тонн эквивалентного количества естественного урана поступает ежегодно от переработки урана, использованного в реакторах по производству плутония (см. приложение). Таким образом, значительная доля урана проходит мимо производственных реакторов. Минатом планирует замкнуть урановый топливный цикл на реакторах по производству плутония путем переработки возвращаемого урана в свежее топливо для тех же самых реакторов¹². Эти реакторы должны быть остановлены к 2000 г. или раньше.

Закрытие десяти реакторов по производству плутония сократило потребности в ВОУ-топливе для производственных реакторов с 1500 кг до 900 кг урана (с 90-процентным обогащением) в год¹³. Необходимость в получении ВОУ на производственных реакторах также уменьшилась в результате сокра-

щения деятельности российского ВМФ¹⁴ и связанного с этим сокращения потребностей в топливе для корабельных реакторов (изготовленного из урана, который извлечен из отработанного топлива на "Маяке")¹⁵. В результате, как сообщают, "Маяк" в течение последних 3-4 лет отказывается перерабатывать ВОУ-топливо из реакторов по производству плутония.

Распад Советского Союза может привести к значительным переменам в комплексе по изготовлению топлива. "Маяк" уже прекратил отправку переработанного урана (в виде уранилнитрата) в Усть-Каменогорск (единственное предприятие топливного цикла, расположенное за пределами России), где шло изготовление топлива для реакторов РБМК, оставив тем самым рециркуляцию урана, возвращенного из отработанного топлива гражданских реакторов. Минатом начал также укреплять возможности изготовления топлива в России путем перестройки производственных линий, чтобы получать окись урана в виде порошка и гранул для реакторов ВВЭР-440 (в Электростали) и ВВЭР-1000 (в Новосибирске). В результате, завод в Усть-Каменогорске может потерять значительную часть заказов по изготовлению топливных элементов¹⁶.

СРЕДСТВА ЦИКЛА ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

С самого начала советский ядерный комплекс был разработан как сеть предприятий, предназначенных для создания ядерного оружия. Но в начале 70-х годов обширная программа ядерной энергетики

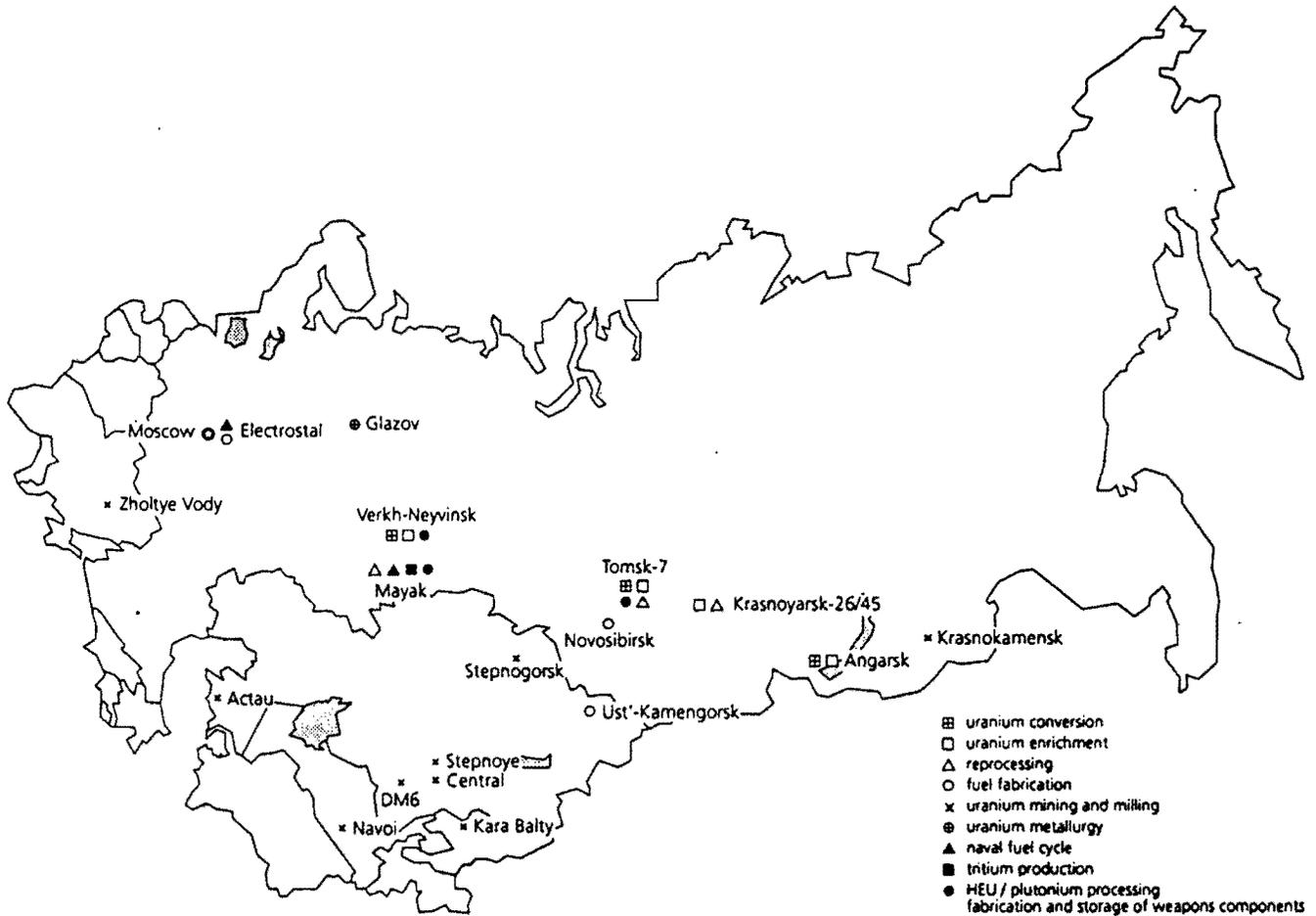


Рисунок 3
Ядерные объекты в бывшем Советском Союзе

Все три площадки были включены (или же их включение планировалось) в контроль за отходами и деятельность по использованию плутония.

Комплексы ищут возможностей для продажи ядерных услуг в другие страны. У "Маяка" есть контракты по переработке отработанного топлива от реакторов ВВЭР-440 из Финляндии, Украины и Венгрии²⁰. В 1992 г. "Маяк" и компания Amersham International (Англия) объявили о создании совместного предприятия Reviss Services. "Маяк" будет производить радиоизотопы (Co-60, Cs-137, C-14, Am-241 и Kr-85), а Amersham будет изготовлять из них конечный продукт и поставлять его на рынок во всем мире²¹. "Маяк" подписал также контракт стоимостью в 6 миллионов долларов с Министерством энергетики США о продаже пяти кг плутония-238 (Министерство дало также согласие на покупку в будущем еще 35 кг²²). Плутоний-238 изготавливается на "Маяке" облучением нептуния-237 в реакторах по производству трития. Томск-7 подписал контракт с Siemens AG (Германия) по выделению урана из лома, накопившегося на заводе по переработке в Германии²³, а Красноярск-26 вел переговоры по переработке с предприятиями Южной Кореи.

Предприятия по переработке и обогащению урана

Российский обогатительный комплекс включает в себя четыре обогатительные установки в Верх-Не-

йвинске, Ангарске, Томске-7 и Красноярске-45 (см. рис. 3 и табл. 3) с общей производительностью 10-18 миллионов рабочих единиц разделения (SWU) в год. Технология разделения изотопов основана на газовых центрифугах с использованием на предварительном этапе установок с газовой диффузией для отфильтровывания химических примесей. В прошлом все четыре площадки действовали как один обогатительный блок, предназначенный для производства ВОУ. После того, как Советский Союз прекратил производство ВОУ в 1987-89 гг., площадки стали работать независимо, производя уран с низким и умеренным обогащением²⁴.

Деятельность обогатительного комплекса поддерживается двумя большими заводами по переработке урана, расположенными рядом с обогатительными заводами в Ангарске и Томске-7, и меньшим по размеру предприятием в Верх-Нейвинске, который выпускает гексафторид естественного урана.

Хорошим примером объединения военной и гражданской деятельности на уровне предприятия служит площадка в Верх-Нейвинске. В бывшем советском обогатительном комплексе это был последний этап обогащения, запитываемый продуктами других заводов. Кроме того, на этой площадке выполнялись операции обработки ВОУ, а также производилось хранение и (возможно) изготовление компонентов с ВОУ для оружия. Некоторые из этих видов деятельности, по-видимому, еще продолжа-

Таблица 1
Урановые рудники и горнообогатительные предприятия в бывших советских республиках

Предприятие/ республика	Рудник	Обогатительный завод	Мощность, т/год	Производство в 1993 г., т/год ¹
Приаргунский комбинат, Россия	Краснокаменск	Краснокаменск	4000	2300
Целинный комбинат, Казахстан ²	Камышовое Шокпак Грачевское Восток Звездное Заозерное	Степногорск	1000	2700 ³
Каскор, Казахстан	Меловое Томак	Актау	1000	
Горно-добывающие управления: Степное, Центральное, № 6, все Казахстан	Степное Таукент Чиили	Кара Балты Степногорск	1900 ⁴	
Горно-металлургический комбинат Навои, Узбекистан	Учкудук Восток Зарафабад Нурабад	Навои	3060 - 4000	2600
Восточный комбинат, Украина	Ватутинский	Желтые Воды	2000	500
Комбинат Кара Балты, Киргизия	нет ⁵	Кара Балты	800	?

¹ UI News Briefing, 94/13, p.3.

² Урановая руда будет продолжать отправляться для обогащения в Кара Балты до 1996 или 1997 г. КАТЕП объявил о приостановке производства урана в Каскоре (UI News Briefing 94/8, p.1) и планирует закрыть обычную подземную добычу в Целинном.

³ Полное производство в Казахстане.

⁴ Полное производство на всех трех рудниках.

⁵ Руда поступает из Казахстана.

ются на площадке и в настоящее время.

Что касается гражданской стороны деятельности, то Верх-Нейвинск стал основным коммерческим обогатительным предприятием. В комплексе работают три обогатительных каскада; два из них (с полной производительностью 3 миллиона SWU) предназначены для обогащения естественного (непереработанного) урана²⁹. Верх-Нейвинск - это единственная площадка в России, способная предоставлять услуги по обогащению и сам обогащенный уран для мирового рынка. (Остальная обогатительная производительность России используется для обогащения урана, возвращенного из облученного топлива от реакторов по производству плутония и загрязненного изотопом урана U-232²⁶). Предприятие - держатель акций торговой компании Минатома "Тенекс", было втянуто в экспортную деятельность с 1973 г. Третий каскад производит уран с промежуточным обогащением (до 30%) для исследовательских реакторов и реакторов на быстрых нейтронах. Недавно Верх-Нейвинск начал переработку и разбавление ВОУ со снятых с вооружения боеголовок до низкообогащенного урана (НОУ), из которого изготавливается топливо для энергетических реакторов в соответствии с американо-российским соглашением по ВОУ²⁷. На площадке производится гексафторид урана со степенью обогащения 4,4% для отправки его в США.

Обогатительный завод в Томске-7 расположен рядом с предприятиями по производству плутония и переработке и может также выполнять работы по переработке ВОУ, имеющего отношение к оружию²⁸.

Основная коммерческая операция на томском обогатительном предприятии заключается в повторном обогащении переработанного урана в рамках долгосрочного соглашения с французской фирмой Cogema. Ожидается также, что Томск-7 будет привлечен к окислению металлического ВОУ в рамках американо-российского соглашения по ВОУ. После этого процесса окись ВОУ будет переправлена в Верх-Нейвинск для фторирования и разбавления до НОУ, а затем отправки в США. На установках в Ангарске и Красноярске-45 производится НОУ для внутренних потребностей, а также ведется обогащение урановых отходов от процесса разделения до уровня естественного урана. Кроме того, некоторые обогатительные установки разделяют другие изотопы (не изотопы урана), в число которых входят изотопы железа, вольфрама, молибдена, ксенона и серы.

Предприятия по производству топлива

Производство реакторного топлива велось на соответствующих комплексах в Электростали, Новосибирске и Усть-Каменогорске. Все три предприятия стали частью советской программы ядерного оружия в конце 40-х годов. Заводы в Электростали и Усть-Каменогорске начали свою деятельность в качестве предприятий по металлургии ядерных материалов. Например, завод в Электростали произвел металлический ВОУ для первых образцов советского оружия. Затем завод стал основным изготовителем топлива для корабельных реакторов. Завод в Усть-Каменогорске был привлечен к изготовлению сплавов

Таблица 2
Предприятия по производству плутония и трития

Предприятие/ расположение	Оборонная деятельность	Гражданская деятельность
Маяк, Челябинск-65	Переработка ВОУ-топлива и производство уранового топлива для корабельных реакторов Производство трития, тритиевых компонентов и нейтронных генераторов на Pu-238 для оружия Возможное хранение компонентов снятого с вооружения оружия с расщепляющимися материалами и тритием	Переработка топлива от гражданских реакторов ВВЭР-440, БН-350/600 и исследовательских реакторов Производство уранилнитрита для получения РБМК-топлива Производство радиоизотопов в сотрудничестве с английской фирмой Контроль за отходами Утилизация плутония (планируется)
Сибирский химический комбинат, Томск-7	Производство плутония для оружия Хранение и возможное производство компонентов оружия	Производство тепла и электроэнергии для близлежащих городов Возврат урана из лома для иностранных компаний Контроль за отходами (планируется)
Горно-химический комбинат, Красноярск-26	Производство плутония для оружия	Производство тепла и электроэнергии для близлежащих городов Хранение отработанного топлива ВВЭР-1000 Переработка отработанного топлива ВВЭР-1000 (планируется) Утилизация плутония (планируется)

бериллия с ВОУ также для топлива корабельных реакторов. Но его основная оборонительная задача заключалась в удовлетворении потребности в бериллии со стороны советской программы ядерного оружия и аэрокосмической программы. После распада СССР Усть-Каменогорский завод стал собственностью независимого Казахстана и потерял практически все военные заказы на бериллий из России³⁰. Завод в Новосибирске начал свою деятельность в 1949 г., как производитель топлива для производства материалов оружейного качества и для исследовательских реакторов, и выполняет эти функции по настоящее время.

В начале 70-х годов все три предприятия были расширены, чтобы изготавливать топливо для энергетических реакторов. Поначалу эта технология была разработана в Электростали и Новосибирске. В 1974 г. первый этап процесса изготовления топлива (производство окиси урана в виде порошка и топливных таблеток) был сосредоточен в Усть-Каменогорске, а предприятия в Электростали и Новосибирске сох-

ранили ответственность за изготовление топливных стержней и сборок³¹. Оборонная и гражданская деятельность мест производства топлива подытожена в табл. 4.

ВЫВОДЫ

Существует еще много связей между гражданским и военным циклами ядерного топлива в России. Этот анализ наводит на мысль, что разрушить связи можно, если потребовать следующего:

- Прекращение производства трития на "Маяке" и плутония в Томске-7 и Красноярске-26.
- Прекращение переработки ВОУ-топлива на "Маяке" и выбор альтернативного источника обогащенного урана для корабельных реакторов (если это необходимо).
- Осуществление физического и организационного разделения деятельности, связанной с оружием, и гражданской деятельности на площадках "Маяка", Томска-7 и Верх-Нейвинска.

Таблица 3
Предприятия по переработке и обогащению урана

Предприятие/ расположение	Доля общей мощности России	Оборонная деятельность	Гражданская деятельность
Уральский электрохимический завод, Верх-Нейвинск	49%	Последний каскад производства ВОУ (в прошлом) Хранение и возможное производство ВОУ-компонентов для оружия Разбавление ВОУ до НОУ	Производство обогащенного урана и услуги по обогащению для экспорта и внутренних нужд Переработка урана
Сибирский химический комбинат, Томск-7	14%	Начальный каскад производства ВОУ (в прошлом) Переработка ВОУ Окисление ВОУ перед разбавлением до НОУ в Верх-Нейвинске	Обогащение урана Переработка урана
Электрохимический завод, Красноярск-45	29%	Начальный каскад производства ВОУ (в прошлом)	Обогащение урана
Электролизный химический комбинат, Ангарск	8%	Начальный каскад производства ВОУ (в прошлом)	Обогащение урана Переработка урана

Таблица 4
Предприятия по производству топлива

Предприятие/ расположение	Оборонная деятельность	Гражданская деятельность
Завод химконцентратов, Новосибирск	Производство топлива для реакто- ров, производящих оружейные ма- териалы	Производство топлива для реакто- ров ВВЭР-1000 Производство топлива для иссле- довательских реакторов
Машиностроительный завод, Электросталь	Производство топлива для кора- бельных реакторов	Производство топлива для реакто- ров ВВЭР-400, РБМК и БН
Ульбинский металлургический завод, Усть-Каменогорск	Производство бериллия	Производство порошковой окиси урана и таблеток для реакторов ВВЭР и РБМК Производство бериллия и тантала

¹ Новосибирский комплекс состоит из трех крупных заводов, производящих топливо для исследовательских реакторов (в виде окиси урана, помещенной в алюминиевую матрицу), ВВЭР-1000 и производящих расщепляющиеся материалы реакторов.

² В состав Усть-Каменогорского комплекса входят четыре крупных завода: бериллиевый завод, завод по производству тантала и полупроводников, завод топлива для ВВЭР и завод топлива для РБМК.

Осуществление этих шагов выполнимо. Действительно, существует национальная программа конверсии по прекращению производства плутония для оружия к 2000 г. Оставшиеся три реактора по производству плутония могут быть остановлены или же преобразованы так, чтобы прекратить производство плутония оружейного качества еще до 2000 г. Эта проблема изучается сейчас совместно американскими и российскими экспертами. Вопрос о преобразовании ВОУ из реакторов по производству материалов в топливо для корабельных реакторов может оказаться спорным, принимая во внимание уже сниженный выход ВОУ из производственных реакторов (с ожидаемым дальнейшим сокращением) и отсутствие потребностей в таком процессе. Наконец, связанные с оружием предприятия, хотя они расположены рядом с гражданскими предприятиями в совместно охраняемых местах, придется, по-видимому, дополнительно оградить.

Проведение четкой линии между военной и гражданской ядерной деятельностью ускорит интеграцию российского ядерного комплекса в международный цикл ядерного топлива. Оно будет способствовать также осуществлению режимов нераспространения, включающих в себя международные меры предосторожности и запрет на производство расщепляющихся материалов для оружия.

ПРИЛОЖЕНИЕ А: ЗАПАСЫ РОССИЙСКОГО УРАНА И ПОТРЕБНОСТИ В НЕМ

В табл. А-1 приведены источники урана, а в табл. А-2 приводится потребление уранового продукта. Большая часть оценок взята (непосредственно или путем приведения к эквивалентному количеству естественного урана) из документа Минатома "Программа развития ядерной энергии в Российской Федерации на период до 2010 г." (М: Минатом, 1992). В табл. А-3 и А-4 представлены наши оценки потребностей в естественном уране и SWU для созданных в СССР (см. табл. А-5) энергетических реакторов, основанные на конструктивных параметрах и рабочих характеристиках (обогащение топлива, степень выгорания, фактор загрузки). Различия между значениями в табл. 1 и 2 и оценками в табл. 3 и 4 может быть частично объяснена учетом Минатома требований к поступающему топливу, технологической и экономической оптимизацией топливного цикла и обслуживания реакторов, а также внутренними несоответствиями в программе.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ НА ЛИТЕРАТУРУ

1. Соединенные Штаты и Россия подписали 2 сентября 1993 г. соглашение о сотрудничестве в развитии национальной системы мер ядерной предосторожности в России. Эффективность программы зависит от уровня допуска иностранных экспертов по охране и гарантиям на предприятия ядерного цикла в России. Запрет на производство расщепляющихся материалов для изготовления оружия, как было предложено президентом Клинтонем осенью 1993 года, потребует инспекций на местах на предприятиях переработки и обогащения урана.
2. Деятельность в рамках военного цикла ядерного топлива включает в себя производство ядерных материалов для оружия, изготовление компонентов оружия и поддержку программы корабельных реакторов.
3. Между 1976 и 1990 гг. топливо от реакторов, производивших плутоний на комплексе "Маяк" в Челябинске, перерабатывалось на заводе в Томске. Пять реакторов по производству плутония было введено в строй на площадке "Маяка" между 1949 г. и 1952 г. - работа на них прекратилась в период между 1987 г. и 1990 г. (T. Cochran and R.S. Norris, "Russian Soviet Nuclear Warhead Production", NWD 93-1, pp.49-51).
4. Топливо от РБМК хранилось на месте, а топливо от ВВЭР-1000 транспортировалось (после периода хранения на месте) на центральное хранилище в Красноярске-26.
5. Интервью с сотрудниками завода в Усть-Каменогорска в ноябре 1993 г. Основная проблема при переводе промышленности на коммерческую основу связана с присутствием изотопа U-232, который создает трудности для профессиональной безопасности. U-232 распадается на Bi-212 и Tl-208, излучающие гамма-кванты высокой энергии.
6. Каждый год для корабельных и исследовательских реакторов используется около 1,5 тонн ВОУ. Материал берется из запасов. (Е. Микерин, Семинар в Риме, июнь 1992 г. и интервью в Москве, май 1992 г.). Хотя большая часть корабельных реакторов использует уран неоружейного качества, в некоторых реакторах, например, реакторах с охлаждением жидким металлом, применяется оружейный уран. Он используется также в реакторах на атомных коммерческих судах (ледоколах и т.п.).
7. Топливо из ВОУ представляет из себя металло-

Таблица А-1
Поставки урана в 1994 году

Источники урана	Эквивалент природного урана, т/год
Восточная Европа	1300
Украина	1000 ¹
Урановые рудники в России	2300 ²
Запасы природного урана	1000 ¹
Отвалы обедненного урана	1600 ³
Уранилнитрит из реакторов, производящих плутоний	750 ⁴
Запасы обогащенного урана	700 ⁵

¹ См. "Программу", стр. 27.
² Производительность Приаргуньского объединения в 1993 г., UI News Briefing, Uranium Institute, London, 1994.
³ В 1994 г. будет проведено обогащение 10560 тонн отходов с уровнем 0,2%, это соответствует 1600 тоннам урана с обогащением 0,7% при обогащении отходов на уровне 0,11%. В будущем будут переработаны отходы с уровнем обогащения 0,24% и 0,36% (как указано в "Программе"): с 2006 г. по 2010 г. ежегодно должно производиться около 4000 тонн урана с обогащением 0,7%.
⁴ Это соответствует 800 тоннам урана с обогащением 0,66% (См. "Программу").
⁵ Это соответствует 100 тоннам урана с обогащением 4,4% ("Программа", стр. 28).

Таблица А-2
Потребление урана в 1994 году¹

Потребление урана	Эквивалент природного урана, т/год
Ядерная энергетика Восточной Европы	1600 ²
Ядерная энергетика Украины	1700
Ядерная энергетика Казахстана	80 ³
Ядерная энергетика Литвы	298
Ядерная энергетика России	2370 ⁴
Экспорт природного урана	2200 (добыча) + 1000 (обогащение отвалов) ¹
Экспорт обогащенного урана	?

¹ Каждый год в Россию поступает около 1000 и 1300 тонн естественного урана, соответственно, из Украины и Восточной Европы. Этот материал обогащается, из него изготавливается топливо, а затем он отправляется обратно. Россия покрывает дефицит, поставляя Украине и Восточной Европе 700 и 300 тонн, соответственно ("Программа").
² "Программа", стр. 26.
³ Это соответствует 11,15 и 41,81 тоннам обогащенного до 4,4% урана, приведенным в "Программе" (стр. 28).
⁴ Это соответствует 332,03 тоннам обогащенного до 4,4% урана, приведенным в "Программе" (стр. 28). На период 1996-2000 гг. потребности реакторов в уране с обогащением 0,7% составят 2564 тонн в год.

Таблица А-3
Оценки потребностей в естественном уране и обогащении (SWU) для сконструированных в СССР энергетических реакторов (в расчете на один реактор).

Тип реактора	Обогащение, %	Количество топлива, т/год ¹	Требования по обогащению, млн. SWU/год	Эквивалент природного урана, т/год
РБМК-1000	2,4	37,8 ⁴	0,154	144
ВВЭР-440	3,6	12,7 ⁵	0,095	73,8
ВВЭР-1000	4,4	18,5	0,181	132,1
ВН-350	20	6,2	0,359	205
ВН-600	25	7,4	0,428	244
Производство Pu	0,7	1200	0	1200

¹ В предположении, что степень выгорания составляет 20 МВт/день на кг урана, и фактор загрузки равен 0,66, реактор РБМК на 1000 МВт (электрических) потребляет около 36 тонн урана, обогащенного до 4,4%, в год. При выгорании 40 МВт/день на килограмм урана ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 потребляют 18,1 и 10,6 тонн в год.
² В предположении, что отходы обеднены до уровня 0,11%.
³ Пренебрегая потерями при обработке и обогащении, которые по порядку величины составляют около 0,5%.
⁴ В предположении, что степень выгорания составляет 20 МВт/день на кг урана, а фактор загрузки равен 0,653, реактор РБМК на 1000 МВт (электрических) потребляет слегка больше 36 тонн урана в год (с обогащением 2,4%).
⁵ В предположении, что степень выгорания составляет 30 МВт/день на кг урана, а средний фактор загрузки равен 0,653, ВВЭР-440 потребляет около 10,6 тонн урана в год. Сейчас реакторы ВВЭР-440 переводятся на четырехлетний срок сгорания топлива вместо трехлетнего, что увеличивает выгорание до 40 МВт/день.

Таблица А-4
Потребности в естественном уране и обогащении (SWU) для стран,
где работают реакторы советской конструкции

Страна	Потребность в природном уране, т/год	Потребность в обогащении, млн. SWU/год
Россия (энергетические реакторы)	3 196	3,959
Россия (производство плутония)	3 600	
Украина	1 757	2,308
Казахстан	205	0,359
Литва	360	0,385
Прочие страны из бывшего СССР	1 460	1,891
Всего без производства плутония	6 978	8,875
Всего с производством плутония	10 578	8,875

Таблица А-5
Действующие и сооружаемые энергетические реакторы советской конструкции

Страна и АЭС	ВВЭР-440	ВВЭР-1000	РБМК	Прочие	Строящиеся (% готовности)
Россия					
Нововоронежская	2	1			
Кольская	4				
Балаковская		4			
Тверская		2			1 ВВЭР-1000 (70)
Курская			4		1 РБМК-1000 (60)
Ленинградская			4		
Смоленская			3		
Белоярская				БН-600	
Билибино				4 x 12	
Украина					
Ровно	2	1			1 ВВЭР-1000 (70)
Запорожье		5			1 ВВЭР-1000 (90)
Южная Украина		3			
Хмельницкая		1			1 ВВЭР-1000 (90)
Чернобыльская			2		
Литва					
Игналинская			2x1250		
Казахстан					
Актау				БН-350	
Болгария	4	2			
Венгрия	4				
Чехословакия	8				2 ВВЭР-440 2 ВВЭР-1000
Финляндия	2				

¹ ВВЭР - водо-водяной энергетический реактор; РБМК - реактор большой мощности, кипящий; БН - реактор на быстрых нейтронах.

² Сооружение некоторых реакторов (не включенных в таблицу) прекращено. Среди них готовый на 30% блок Тверь-4 (местные власти разрешили работу Твери-3, но остановили сооружение Твери-4), блоки Ростов-1 и Ростов-2, и два блока АСТ-500 (атомная тепловая станция) в Воронеже, а также проект реактора на быстрых нейтронах в районе Южного Урала. Перспективы завершения этих реакторов неясны.

³ Это реакторы с графитовым замедлителем и охлаждением водой под давлением обеспечивают тепловую и электрическую энергию.

- керамику - порошок окиси урана в алюминиевой матрице. В реакторах по производству плутония стержни из ВОУ размещаются по кольцу, чтобы выровнять мощность, выделяемую в сердцевине активной зоны. В реакторах по производству трития также используется ВОУ-топливо.
- Выгорание в 75% означает, что 75% содержащегося расщепляющегося материала (атомы U-235) претерпели деление. Оставшийся уран - 42,3% от начального количества урана со степенью обогащения 90%, обогащен U-235 на 53% и содержит около 23% U-236 (образованием плутония из U-238 пренебрегается, а отношение захвата нейтронов к делению принимается равным 0,169).
 - Примерно 1000 тонн урана изымается ежегодно с российских складов и еще 1000 тонн появляется после обогащения прошлых отходов до уровня естественного урана. (Минимальное содержание U-235 в отходах составляет 0,11%.) См. "Программу развития ядерной энергии в

Российской Федерации на период до 2010 г." (Москва: Минатом, 1992). Интервью с российскими должностными лицами, декабрь 1993 г.

- В 80-е годы пять реакторов по производству плутония и два по производству трития работали на "Маяке"; пять и три реактора по производству плутония работали в Томске-7 и Красноярске-26, соответственно. Реакторы по производству трития - это легководные реакторы с мощностью 1000 МВт; реакторы по производству плутония имеют графитовые замедлители и охлаждаются водой под давлением, их мощность составляет 2000 МВт (первые два реактора на "Маяке" имели мощность 500 и 68 МВт). В настоящее время один реактор по производству плутония с мощностью 2000 МВт работает в Красноярске-26, два - в Томске-7 и два реактора по производству трития - на "Маяке".
- Report at Working Group on Nuclear Reactors, Joint Study on Plutonium Production Reactor

- Replacement, USDOE, 14-16 March 1994.
12. В настоящее время реакторы запитываются естественным ураном. "Программа развития ядерной энергии в Российской Федерации на период до 2010 г." (М: Минатом, 1992).
 13. При факторе загрузки 0,7, выгорания ВΟΥ до 75% и энергоемкости ВΟΥ 1,05 г/МВт-день для производства одного МВт-года потребуется 0,36 тонн урана с обогащением 90%. Таким образом, реактор с ВΟΥ мощностью 1000 МВт потребляет 362,5 кг ВΟΥ в год. Судя по американским источникам, три реактора по производству плутония потребляют 200 кг ВΟΥ в год (то-есть, 33 кг ВΟΥ на 1000 МВт-день). Таким образом, при полной мощности 22600 МВт все 13 реакторов по производству плутония потребляют около 750 кг ВΟΥ ежегодно.
 14. В настоящее время Россия имеет на дежурстве только одну стратегическую подводную лодку в каждый данный момент времени (Bulletin of the Atomic Scientists, November 1993, p.56).
 15. При степени выгорания 75% 1478 и 925 кг урана с обогащением 90% дадут примерно 620 и 390 кг урана с обогащением 53%, соответственно.
 16. Интервью с сотрудниками Усть-Каменогорского завода в ноябре 1993 г.
 17. D.Bradley and K.Schneider, "Radioactive Waste Management in the U.S.S.R.: A Review of Unclassified Sources, 1963-1990", PNL, March 1990, pp.A.23-A.24.
 18. Размер резерва оценивается, по крайней мере, в 227 тонн урана. См. [17], стр.А-24.
 19. В 1975 г. было решено построить хранилище РТ-2 и завод по переработке топлива от реакторов ВВЭР-1000. Сооружение хранилища началось в 1976 г. и оно начало действовать в 1985 г. Сооружение перерабатывающего завода было задержано и вряд ли оно завершится до 2000г. (T. Cochran and R.S.Norris, "Russian.Soviet Nuclear Warhead Production", NWD 93-1, p.101).
 20. Nuclear Fuel, 19 July 1993, 27 September 1993, and 3 January 1994.
 21. Nuclear Engineering International, December 1992, pp.38-39.
 22. Frank von Hippel, "Limiting Stockpiles of Separated Civil Plutonium", (draft).
 23. В соответствии с соглашением, подписанным Siemens AG и Томском-7 в 1993 г., в Томск поступит около 140 тонн лома с примесями урана (накопленного на заводе по производству топлива в Ханану, Германия) для выделения урана в 1994 г. В ответ Siemens получит 70 тонн UF (Nuclear Fuel, 17 January 1994).
 24. Завод в Верх-Нейвинске получил лицензию на обогащение урана до 30% (интервью с российскими должностными лицами, 18 декабря 1993 г.). У всех остальных предприятий есть лицензии на обогащение только не более пяти процентов.
 25. Персональная переписка с Т.Неффом из M.I.T. (February 1994).
 26. Персональная переписка с Т.Неффом (December 1993).
 27. США закупят приблизительно 500 тонн ВΟΥ, полученного из российского оружия - по крайней мере, по 10 тонн в год в течение первых пяти лет и по 30 тонн в год в течение остальных 15 лет.
 28. Возможно, что предприятие по обогащению в Томске-7 способно обрабатывать ВΟΥ и хранить его, а также изготавливать для оружия ВΟΥ-компоненты.
 29. В соответствии с контрактом, подписанным в марте 1991 г. Тенексом и Cogema, завод в Томске-7 обогащает переработанный уран из Франции примерно до 4% со скоростью 500 тонн переработанного урана в год. Контракт действителен до 2000 г. (T.Cochran and R.S.Norris, "Russian.Soviet Nuclear Warhead Production", NWD 93-1, pp.94-95).
 30. Интервью с должностными лицами завода в Усть-Каменогорске (ноябрь 1993 г.).
 31. Интервью с должностными лицами ядерной промышленности России и Казахстана (1993 г.).