

## АНАЛИЗ РАЗМЕРОВ И КАЧЕСТВА УРАНОВЫХ ЗАПАСОВ РОССИИ

Олег Бухарин

Существует мало официальной информации о запасах урана в России, об истории его производства и использования. Но можно провести некоторые оценки, основываясь на внимательном анализе программ производства расщепляющихся материалов для оружия, корабельных двигателей и энергетических реакторов, а также на разумных допущениях об эволюции советского/российского обогатительного комплекса.

Автор - сотрудник Центра по изучению энергетики и окружающей среды в Принстонском университете, Принстон, Нью Джерси, США.

### ВВЕДЕНИЕ

Оценка запасов естественного и высокообогащенного урана (ВОУ) важна для разработки эффективных стратегий контроля над расщепляющимися материалами, совместных мер по "прозрачности" при сокращении вооружений и для определения будущего ядерной энергии. К сожалению, как по коммерческим соображениям, так и с точки зрения безопасности многие страны сохраняют секретность в отношении, по меньшей мере, некоторых наиболее важных данных о своих запасах. Это особенно подтверждается в случае России, где фактически не существует официальной информации относительно производства и потребления урана. Аналитическая задача по оценке российских урановых запасов еще более затрудняется из-за сложности цикла ядерного топлива в России, тесного слияния военных и гражданских программ и повторного использования урана, выделенного из облученного реакторного топлива. По этим причинам имеющиеся общедоступные данные не позволяют в настоящее время провести с высокой точностью независимые оценки запасов естественного и обогащенного урана в России. Однако по этим данным можно провести

некоторые грубые оценки запасов, хотя и со значительными неопределенностями.

### ПРОИЗВОДСТВО И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

На рис.1 показана схема производства и использования естественного урана и ВОУ, откуда можно оценить текущие запасы. Уран для советской ядерной программы добывался в СССР и импортировался из стран Восточной Европы. Естественный уран, в основном, использовался для производства оружейного плутония, среднеобогащенного урана (для корабельных двигательных реакторов) и низкообогащенного урана (для реакторов атомных электростанций). Фактически весь ВОУ производился из урана, регенерированного из облученного топлива реакторов для производства плутония. Оценка полного производства, использования и регенерации естественного урана и ВОУ дает возможность получить представление о размере российских урановых запасов и определить их качество. Возможно также отождествление основных источников неопределенностей. Их улучшение обеспечит более точные оценки запасов.

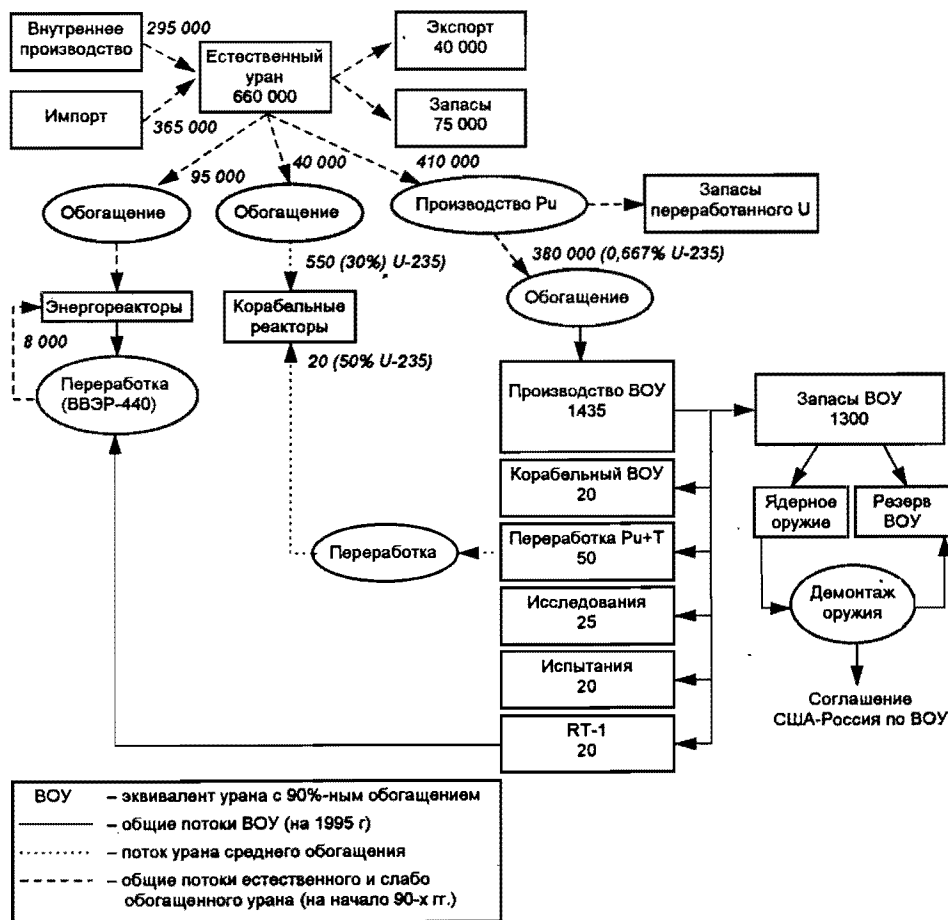


Рисунок 1: Производство и использование природного и высокообогащенного урана (в тоннах).

## ДОБЫЧА И ИМПОРТ ЕСТЕСТВЕННОГО УРАНА

Добыча урана в Советском Союзе началось в 1945 г. на месторождении Табошар в Таджикистане<sup>1</sup>. В конце 40-х и в 50-х гг. уровень добычи увеличивался благодаря расширению работ в Табошаре и разработке относительно небольших месторождений в республиках Центральной Азии, России и Эстонии. Добыча урана и его обработка были также организованы (и их уровень рос) в Восточной Европе.

Нехватка урана оставалась крупным ограничением для советской ядерной программы, пока не вступили в действие новые крупные центры по производству урана в 60-х и в начале 70-х гг. Эти центры - Целинный и Каскор в Казахстане, Навои в Узбекистане и Приаргунский в России, составили основу советского уранового комплекса. Продолжался значительный импорт из Чехословакии, Восточной Германии, Венгрии и Болгарии. В 70-е и 80-е гг. полное производство достигало, вероятно, 20 000 тонн урана (или более) в год, причем значительная часть поступала из Чехословакии и Восточной Германии<sup>2</sup>.

Сокращение оборонных требований во второй половине 80-х гг. и застой в ядерной энергетике после аварии в Чернобыле в 1986 г. привели к заметному сокращению требований на уран, так что после 1988 г. его производство стало слегка сокращаться. К моменту распада СССР осенью 1991 г. производство упало на 40% по сравнению с пиком в середине 80-х гг.<sup>3</sup>. Последующий распад советского уранового комплекса заметно сократил базу естественного урана, доступного для России.

Неизвестно, сколько урана получил к тому времени советский ядерный комплекс. Судя по некоторым данным, в Советском Союзе было произведено около 250 000 тонн. Как считают эксперты ОЕСД, в СССР до 1991 г. могло быть добыто до 340 000 тонн<sup>4</sup>. Мы полагаем, что полная советская добыча составила 295 000 тонн. Кроме того большое количество урана для использования в СССР было добыто в Восточной Европе. Примерно 220 000 тонн было получено на комплексе Висмут в ГДР к моменту его закрытия в 1990 г.<sup>5</sup> По состоянию на 1992 г. полная добыча урана в Чешской республике составило 100 590 тонн, а в Венгрии - 19 880 тонн<sup>6</sup>. Примерно 25 000 тонн было добыто в Болгарии<sup>7</sup>. Добыча урана в Монголии не началась до 1989 г., а после этого уровень производства был относительно низким<sup>8</sup>. Таким образом, полное количество естественного урана, добытого в СССР и поступившего извне, к началу 90-х гг. можно оценить в 660 000 тонн<sup>9</sup>.

В настоящее время добыча и обработка урана сохраняются в России на Приаргунском горно-химическом комбинате. При производительности 4000 тонн/год комплекс в 1993 г. выработал 2300 тонн. Ожидается, что производство будет продолжать уменьшаться<sup>10</sup>. Правительство России заявило, что вся новая добыча урана будет доступна для экспорта.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО УРАНА

Добытый в Советском Союзе и Восточной Европе естественный уран использовался для производства оружейного плутония, для получения урана со средним уровнем обогащения (запитка корабельных реакторов) и низкообогащенного урана (запитка изготовленных в СССР энергореакторов), как указано на рис.1. Все остальное было использовано для создания стратегического резерва естественного урана. Начиная с 1988 г., СССР/Россия также экспортирует естественный и обогащенный уран.

### Производство плутония для оружия

СССР/Россия произвели, по оценкам, 177 тонн плутония для оружия<sup>11</sup>. Первый советский реактор для производства плутония начал работать на площадке "Маяк" (Урал) в 1949 г. К 1969 г. плутоний изготовлялся в 13 реакторах на трех площадках с общей мощностью 22 565 МВт (см. рис.2)<sup>12</sup>. В период между 1987 и 1992 гг. десять производивших плутоний реакторов были остановлены. Оставшиеся три производят тепло и электроэнергию для местного населения. Похоже, что они будут работать и после 2000 г. пока не станут доступными альтернативные источники электроэнергии<sup>13</sup>.

Если допустить, что реакторы были переведены на замкнутый цикл ядерного топлива в 1991 г., то полные

потребности в естественном уране для программы производства плутония составили примерно 410 000 тонн<sup>14</sup>. Облученное топливо перерабатывалось и до 1989 г. регенерированный уран использовался для производства ВОУ. Итак, производства ВОУ и плутония были взаимосвязаны.

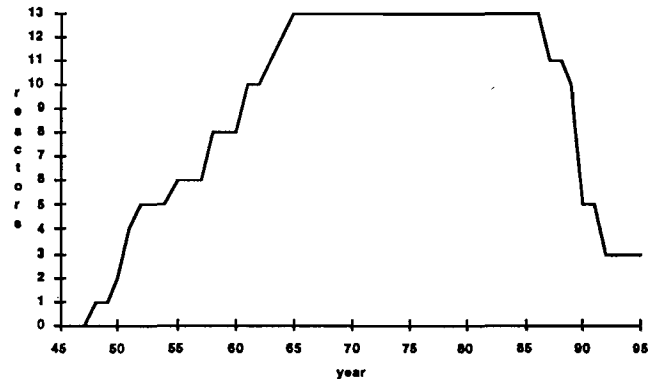


Рисунок 2: Число производящих плутоний реакторов в России. Число реакторов отложено по оси ординат, годы - по оси абсцисс. Рисунок заимствован из книги Кохрена, Норриса и Бухарина "Создание русской бомбы: от Сталина до Ельцина", Westview Press, 1995.

Переработанный уран (в количестве, примерно, 99.2% от исходного) содержал 0.667% U-235, а также полученные в реакторе изотопы U-232 и U-236<sup>15</sup>. При потерях на переработку порядка 1% количество регенерированного урана, доступного для получения ВОУ, можно оценить, примерно, в 380 000 тонн<sup>16</sup>. По нашим оценкам, полные потребности в переработанном уране для производства ВОУ составляют 373 000 тонн (см. ниже).

### Производство обогащенного урана для корабельных реакторов

Согласно оценкам, на 258 подводных лодках и надводных кораблях советского/российского флота, а также на ледокольном флоте установлено 468 реакторов (см. рис.3). Двадцать четыре из них, как считается, были спроектированы на загрузку ураном со степенью обогащения 90% по изотопу U-235 (см. ниже). Предположим, что ВОУ для этих реакторов было взято из запасов ВОУ. Но большинство реакторов загружалось ураном со степенью обогащения 21-45% по U-235<sup>17</sup>. Производство такого урана со средней степенью обогащения обеспечило значительную потребность в естественном уране и средствах обогащения.

Если предположить, что реакторы были запроектированы на три перезаправки топлива за период активного существования (примерно, 30 лет), то для программы корабельных двигателей было изготовлено, приблизительно, 1800 активных реакторных зон со средней степенью обогащения. Предположим, что типичная активная зона содержит 315 кг урана и что средняя степень обогащения составляет 30% по U-235. Тогда было использовано 570 тонн 30%-ного обогащенного урана, чтобы изготовить топливо для корабельных реакторов<sup>18</sup>. Судя по оценкам, 20 тонн урана со средней степенью обогащения было регенерировано из облученного ВОУ-топлива реакторов для производства материалов (см. ниже) и преобразовано в топливо для корабельных реакторов. Оставшиеся 550 тонн были произведены путем обогащения естественного (и возможно, переработанного) урана. По нашим оценкам, потребности в естественном уране и обогатительном потенциале составляют 40 000 тонн и 33 миллиона SWU соответственно<sup>19</sup>.

### Производство низкообогащенного урана для гражданских энергетических реакторов

Прототипы реакторов РБМК (с графитовым замедлителем и водяным охлаждением) и ВВЭР (водяные реакторы под давлением) были запущены на Белоярской и Нововоронежской атомных станциях в 1964 г.

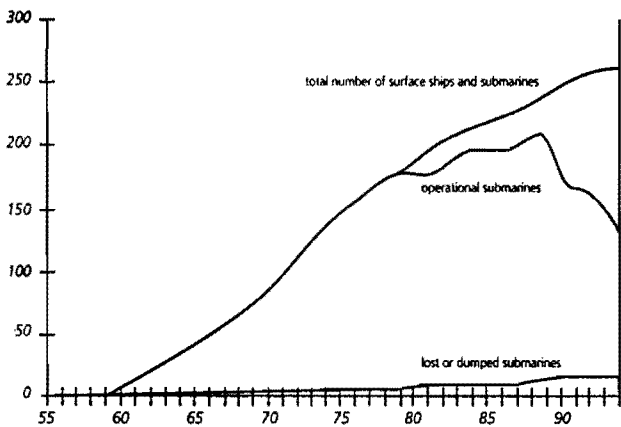


Рисунок 3: Советский/российский флот с ядерными двигателями. По оси ординат отложена численность флота, по оси абсцисс - годы. Верхняя кривая учитывает полное число подлодок и надводных судов; на средней кривой указано число действующих подлодок; на нижней - число пропавших или затонувших подлодок. Рисунок взят из статьи О. Бухарина и Дж.Хэндлера "Снятие с эксплуатации российских атомных подводных лодок", Наука и всеобщая безопасность, т.5, вып.2, ноябрь 1995 г., стр.55.

Крупномасштабное развертывание атомных электростанций в Советском Союзе и Восточной Европе началось в первой половине 70-х гг.; его темпы достигли пика в 80-е гг. (см. рис.4). Потребление естественного урана и потребности в обогащении до 1989 г. можно подсчитать на основе ежегодных потребностей для каждого реактора и полного числа операционных реактор-лет с добавлением первоначальных потребностей за два года (см. табл.1 и 2).

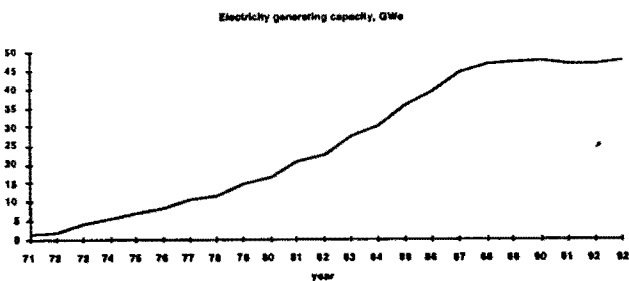


Рисунок 4: Полная мощность созданных в СССР атомных электростанций. Полная электрическая мощность (ГВт) отложена по оси ординат, по оси абсцисс отложены годы.

Расчеты следовало бы скорректировать с учетом экономии урана и количества SWU, которая была получена при повторном использовании урана, извлеченного из облученного топлива энергетических реакторов (главным образом из ВВЭР-440). Переработка топлива ВВЭР-440 началась в 1978 г. на уральском радиохимическом предприятии РТ-1<sup>20</sup>. В период между 1981 и 1991 гг. переработанный уран повторно использовался в реакторах РБМК<sup>21</sup>. (Затем выделенный на РТ-1 уран использовали, чтобы изготовить топливо для реакторов, производящих плутоний.) Средняя производительность завода РТ-1 составляла 200 тонн тяжелого металла в год. Мы считаем, что полученный уран (примерно 190 тонн урана с обогащением 1.25%) перемешивался с ВОУ (1.8 тонн с 90%-ным обогащением), чтобы получить требуемый уровень обогащения (примерно 2% по U-235). Итак, за 10 лет завод произвел, как оценивается, 1900 тонн урана с 2%-ным обогащением, что позволило сэкономить примерно 8500 тонн естественного урана и три миллиона SWU. Повторное использование переработанного урана сократило потребности в естественном уране для программы атомной энергетики с 103 500 до 95 000 тонн (на 1989 г.).

Таблица 1: Полные потребности в естественном уране и обогатительном потенциале (SWU) до 1989 г.

Реактор	Годы	SWU (млн.)	U (тыс. т)
ВВЭР-440	387 <sup>a</sup>	20.9	37.8
ВВЭР-1000	90	11.4	18.9
РБМК-1000	169 <sup>b</sup>	15.7	37.1
БН-350/1000	18/10	4.27/3.6	5.4/4.5

<sup>a</sup> Включая нормированные 20 и 26 реактор-лет работы реакторов ВВЭР-210 и ВВЭР-365.  
<sup>b</sup> Принимая во внимание закрытие Чернобыля-4 и работу Игналины-1,2 на уровне 1250 МВт (по электричеству).

Таблица 2: Потребности в уране и SWU в расчете на реактор для атомных электростанций советской конструкции.

Реактор	U-235, %	Топливо (т/год)	SWU (10 <sup>6</sup> /год)	U (т/год)
ВВЭР-440	3.5	12.5	0.054	98
ВВЭР-1000	4.4	21	0.127	210
РБМК-1000	2.1	50	0.093	220
БН350/1000	20/25	6.2/7.4	0.24/0.35	298/445

Использование урана в 90-х гг.

Россия продолжает сохранять значительные потребности в уране, чтобы обеспечить топливо для своих энергетических реакторов и реакторов, производящих плутоний. Дополнительный уран используется для производства топлива, чтобы запитывать атомные электростанции в Литве, Казахстане, на Украине и в странах Восточной Европы. Эти потребности частично удовлетворяются путем повторного использования переработанного урана и обогащения урановых отходов от разделительных процессов.

Три еще действующих реактора по производству плутония требуют 3600 тонн урана в год. Из реакторов ежегодно выгружается 3500 тонн урана с обогащением 0.067%. Разбавление переработанным ураном от плутониевых реакторов, примерно, сотни тонн 1.25%-ного урана, регенерированного на перерабатывающем заводе РТ-1 из отработанного топлива от реакторов ВВЭР-440, и одной тонны 90%-ного урана даст 3600 тонн урана с той же степенью обогащения, какой обладает естественный уран<sup>22</sup>. Но поскольку переработанный уран используется только однократно, всего лишь половина переработанного урана может быть повторно использована в промышленных реакторах<sup>23</sup>. Для полного обеспечения потребностей реакторов по производству плутония переработанный уран, как кажется, должен быть разбавлен естественным ураном.

Ежегодные потребности двадцати семи российских коммерческих атомных электростанций в естественном уране оцениваются в 3200 тонн<sup>24</sup>. Кроме того Россия использует каждый год 1300-1400 тонн для производства топлива из низкообогащенного урана (НОУ), которое используется в реакторах советской конструкции, расположенных в бывших советских республиках и в Восточной Европе<sup>25</sup>. Похоже, что потребности атомной энергии покрываются ураном, который производится путем обогащения отходов от прошедшей деятельности по разделению изотопов урана. Обогащение отходов началось после того, как в 1988 г. прекратилось производство ВОУ и значительная часть обогатительного потенциала стала излишней. Фактический уровень ежегодного производства не известен, но, по-видимому, он равен по порядку величины нескольким тысячам тонн естественного урана, а этого достаточно для удовлетворения потребностей атомной энергетики<sup>26</sup>.

В 1988 г. Советский Союз начал экспорт естественного урана и НОУ на Запад. Объем экспорта быстро рос до 1992 г., когда министерство торговли США ограничило ввоз урана в США из стран бывшего СССР. Ограничительная политика в отношении ввоза урана из стран бывшего СССР в страны Евротома была принята также агентством Евротома по поставке сырья. Но экспорт урана из России и других бывших советских республик продолжался. Специалисты по анализу рынка полагают, что к 1995 г. полный объем экспорта урана из бывших советских республик вырастет до 40 000 тонн<sup>27</sup>.

## ПРОИЗВОДСТВО И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОУ

## Производство ВОУ

Производство ВОУ для создания ядерного оружия продолжалось с 1950 до 1988 г.<sup>28</sup> Полная история советской обогатительной программы все еще секретна. Но известны следующие ключевые пункты программы:

- Производство ВОУ на газово-диффузионных предприятиях началось в 1950 г.<sup>29</sup>
- Промышленное разрывание технологии центрифуг началось в 1962 г.<sup>30</sup>
- Технология газовой диффузии была полностью снята в 1991 г.<sup>31</sup>
- После перехода на центрифуги полная производительность обогащения выросла в 2,4 раза и достигла 20 миллионов SWU/год.<sup>32</sup>
- Между 1973 и 1988 г. Советский Союз экспортировал на Запад 40 миллионов SWU<sup>33</sup>. В эту величину входит производство НОУ для западных покупателей на основе иностранного уранового сырья.

Для расчета объема производства ВОУ сделаем следующие дополнительные предположения:

- Производительность обогащения линейно росла от нуля в 1950 г. до 8,3 миллиона SWU в 1962 г. и до 20 миллионов SWU в 1991 г.<sup>34</sup>
- Переработанный уран обогащался от 0,067% до 90% по U-235. (Всюду дальше, если специально не оговорено, ВОУ означает эквивалент 90%-го обогащенного урана.) Среднее содержание U-235 в отходах составляет 0,36% между 1950 и 1962 г. и 0,3% между 1962 и 1988 г. (На производство топлива для корабельных реакторов и атомных электростанций использовался естественный уран.)

За период газовой диффузии (1950-1962 гг.) обогатительный комплекс затратил 49,8 миллиона SWU, что соответствует 270 тоннам ВОУ.

За второй период (1963-1988 гг.) комплекс затратил 365,9 миллионов SWU. Из этого числа, как оценивается, 32,7 и 52,4 миллионов SWU были использованы для программ корабельных и энергетических реакторов, соответственно; кроме того 40 миллионов SWU были экспортированы на Запад. Мы оцениваем, что оставшиеся 240,8 миллионов SWU были использованы для производства 1200 тонн ВОУ.

Предполагая, что потери при обработке составляют 3%, можно оценить общий объем производства ВОУ в период 1950-1988 гг. в количестве 1430 тонн.

## Использование ВОУ для производства оружия

Как сообщается советский ядерный арсенал достиг максимума в 45 000 боеголовок в начале 80-х гг. Приняв среднее содержание ВОУ в боеголовке, равное 15 кг, мы получаем, что 675 тонн ВОУ были переработаны в компоненты оружия<sup>35</sup>. Некоторое количество ВОУ было, по-видимому, направлено в стратегический резерв.

В конце 80-х гг. Советский Союз предпринял программу демонтажа боеголовок и сегодня численность боеголовок оценивается в 20 000 - 30 000<sup>36</sup>. Соответствующее содержание ВОУ может составить 300-450 тонн. Примерно 200-400 тонн ВОУ могли быть возвращены из оружия и направлены в хранилища на демонтажных площадках Томск-7 и Челябинск-65. Осенью 1994 г. Россия начала разбавление ВОУ до НОУ в рамках американо-российского соглашения по ВОУ. (В 1995 финансовом году 6 тонн ВОУ должны быть разбавлены до НОУ и отправлены в США; в 1996 г. следует разбавить и отправить 12 тонн ВОУ.)

Ожидается, что Россия сократит свой арсенал до 5 000 - 10 000 ядерных боеголовок к 2003 г.<sup>37</sup>. Содержание ВОУ, соответствующее арсеналу такого размера, будет равным 75-150 тоннам. Таким образом, около 500-600 тонн ВОУ могут в конечном счете оказаться избыточными в России.

## Использование ВОУ в реакторах по производству ядерных материалов

В России небольшое количество ВОУ используется в реакторах для производства как плутония, так и трития. В

реакторах, производящих плутоний, применяется кольцо из стержней с ВОУ для выравнивания распределения мощности внутри активной зоны реактора. Судя по сообщениям, три реактора с мощностью по 2000 МВт потребляют 250 кг ВОУ в год<sup>38</sup>. На основе этих данных мы оценили, что полное потребление ВОУ реакторами, производящими плутоний, составляет 23,5 тонн (по состоянию на конец 1994 г.).

Производство трития велось на "Маяке" в Челябинске-65 с начала 50-х гг.<sup>39</sup>. Реакторы для производства трития имеют такую конфигурацию, где нейтроны из центральной зоны, заполненной ВОУ, облучают материал мишени (для производства трития мишенью является литий-6). К 1995 г. реакторы для производства трития произвели в итоге 17,5 МВт-дней<sup>40</sup>. При 75%-ном выгорании топлива потребуется около 25 тонн ВОУ для производства такого количества энергии<sup>41</sup>.

Облученное ВОУ-топливо из реакторов по производству ядерных материалов перерабатывалось для выделения обогащенного урана. При 75%-ном выгорании одна тонна ВОУ (с 90%-ным обогащением) преобразуется в 0,42 тонны урана, содержащего примерно 53% U-235 и 23% U-236. Итак, реакторы для производства материалов произвели около 20 тонн урана со средним уровнем обогащения. Из основной части его, как полагают, было изготовлено топливо для корабельных реакторов. (Этот материал приходится разбавлять для уменьшения содержания U-234. Кроме того, требуются более высокие концентрации U-235 для компенсации присутствия поглощающего нейтроны изотопа U-236.)

## Другие примеры использования ВОУ

Значительное количество ВОУ было использовано в других оборонных и гражданских программах.

Корабельные реакторы. Как показывают оценки, 24 корабельных реактора были запитаны ВОУ-топливом<sup>42</sup>. Мы полагаем, что производство активных зон для этих реакторов (как начальных, так и дублирующих) потребовало 20 тонн ВОУ<sup>43</sup>.

Исследовательские установки. В настоящее время в России имеются 43 исследовательских реактора и 52 критические (плюс 18 подкритических) сборки<sup>44</sup>. Несколько реакторов были построены и продолжают действовать в других советских республиках и зарубежных странах. Эти установки были спроектированы на использование урана с разной степенью обогащения; количество топлива на реактор меняется в пределах от нескольких кг до нескольких сот кг. Мы полагаем, что для подпитки установок исследовательского типа было использовано 25 тонн ВОУ<sup>45</sup>.

Ядерные испытания. Как сообщается, в Советском Союзе было проведено 1100 ядерных взрывов в период 1950-1989 гг.<sup>46</sup> Если допустить, что на каждый взрыв приходится 15 кг ВОУ, то на всю программу испытаний ушло 16,5 тонн ВОУ.

Разбавление переработанным ураном. Если предположить, что в период 1981-1991 гг. ежегодно тратилось по 1,8 тонне ВОУ для регулирования степени обогащения урана, переработанного на заводе РТ-1, то полный объем потребностей в ВОУ для этих целей составил 18 тонн.

## ЗАПАСЫ УРАНА

## Размер урановых запасов

Запасы урана в России содержат естественный уран, ВОУ, обедненный уран и переработанный уран (см. табл. 3).

Таблица 3: Основные компоненты уранового запаса России на 1995 г. (тонн).

ВОУ (90%-ное обогащение)	1 300
Естественный уран	75 000
Отходы урана:	
от обогащения необлученного урана	130 000
от обогащения переработанного урана	370 000
Переработанный уран	< 30 000

За несколько последних лет производство и потребление естественного урана в пределах России находились в относительном равновесии друг с другом, а небольшой дефицит компенсировался из национального уранового фонда. Поэтому размер национального уранового запаса России

определяется, в основном, производством и использованием урана в Советском Союзе накануне его распада в 1991 г. и экспортом урана на Запад после 1988 г.

К началу 90-х гг. СССР произвел и вывез из Восточной Европы 660 000 тонн урана. Как оценивается, по состоянию на начало 90-х гг. 450 000 тонн и 95 000 тонн урана были использованы в оборонной программе и в программе атомных электростанций, соответственно. После распада Советского Союза в 1991 г. производство и внутреннее потребление урана находились в равновесии друг с другом. Запас естественного урана сократился с, примерно, 115 000 тонн до 75 000 тонн из-за экспорта на Запад.

В период 1950-1989 гг. Советский Союз выработал 1430 тонн ВОУ. Приблизительно 130 тонн ушло на производство плутония и трития, на разбавление переработанным ураном, на запитку исследовательских и корабельных реакторов и на ядерные испытания. Оставшийся запас ВОУ составляет 1300 тонн.

Основной компонент оставшегося запаса - это резервы обедненного урана (в виде гексафторида урана или чистого металла). Урановые отходы (130 000 тонн по оценкам) остались после обогащения естественного урана для атомных электростанций и корабельных реакторов; около 370 000 тонн отходов появились при обогащении переработанного урана до ВОУ. Содержание U-235 в отходах колеблется от 0.18 до 0.4%.

Существуют также запасы переработанного урана. По нашим оценкам, около 30 000 тонн урана, возвращенного из облученного топлива реакторов для производства плутония, не были использованы в производстве ВОУ<sup>47</sup>. (Запасы могли бы оказаться меньше, если использовать переработанный уран для создания топлива корабельных реакторов.) Неизвестно, был ли использован этот материал и каким образом. Могут существовать также относительно небольшие запасы урана с обогащением 2.0-2.4%, регенерированного из облученного топлива от реакторов ВВЭР-440 и корабельных реакторов.

#### Качество урановых запасов

Повторное использование переработанного урана сильно повлияло на качество российских урановых запасов. Загрязнение ВОУ другими изотопами (U-232, U-236) и транс-урановыми элементами уже привело к замедлению осуществления американо-российского соглашения и возможны дальнейшие отсрочки<sup>48</sup>. Действительно, представители Минатома уже указали, что из-за технических трудностей и нежелания внести смуту на урановый рынок Россия предпочла бы не разбавлять более 12-15 тонн ВОУ в год (первоначально планировались темпы разбавления 10 тонн/год в течение первых пяти лет и 30 тонн/год в течение следующих<sup>49</sup>).

Удаление загрязнений и разбавление потребуют значительной дополнительной обработки ВОУ, куда входят двойное осаждение из раствора и использование разбавляющего 1.5%-ного урана<sup>50</sup>. Высокая концентрация изотопа U-234 требует использования разбавителя, полученного из урановых отходов с обедненным содержанием изотопа U-234<sup>51</sup>. Российским предприятиям будет нужно более года, чтобы развить промышленную инфраструктуру для этих целей<sup>52</sup>. Такая обработка увеличит рабочие затраты и уменьшит конечные доходы.

Использование переработанного урана привело к загрязнению значительной (до 90%) части российского обогащенного комплекса. Как сообщается, Екатеринбург-44 является единственным предприятием в России, где часть производственного потенциала (по оценкам, 2-3 миллиона SWU) не была использована для обогащения переработанного урана; ее можно использовать для производства изделий из обогащенного урана с рыночным качеством.

У запасов естественного урана также могут появиться проблемы с качеством. В результате длительного хранения в заржавленном виде материал может нуждаться в дополнительной очистке. Однако масштабы этой проблемы не известны.

#### НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В России практически вся информация о запасах урана, а также о производстве и использовании расщепляющихся материалов является засекреченной. По этой причине любой анализ запасов оказывается в определенной степени

предположительным и неопределенным. Основные неопределенности, относящиеся к запасам ВОУ, сводятся к следующим:

- История наращивания обогащенного потенциала. В связи с тем, что существует разрыв между прогрессом в технологии обогащения и возможностями промышленности организовать массовое производство нового оборудования и его установку, предложенная модель линейного роста обогащенного производства может привести к переоценке общего количества работы по обогащению (количества SWU).
- Оценки содержания U-235 в отходах. Запасы ВОУ очень сильно зависят от обогащения образцов отходов. Например, уменьшение содержания U-235 от 0.36 до 0.3% в период газовой-диффузионного метода и от 0.30 до 0.25% в период центрифужной методики понизило бы оценки запасов ВОУ от 1300 тонн до 1155 тонн.
- Использование ВОУ в реакторах для производства материалов. Количество ВОУ, использованное для получения трития и плутония, могло бы оказаться выше, если степень выгорания топлива составит 20-25% вместо предполагаемого значения 75%.
- Производственные "потери" (количество материала внутри производственной линии) и потери при обработке.
- Размер арсенала ядерного оружия и среднее содержание ВОУ в единице оружия.

Для запасов естественного урана основные неопределенности связываются с отсутствием следующей информации:

- Общий объем производства и импорта урана.
- Использование переработанного урана в производстве обогащенного урана для оружия и корабельных реакторов.
- Общий объем производства ВОУ и плутония.
- Использование переработанного урана в конце 80-х и начале 90-х гг.
- Потери при изготовлении и обработке на различных стадиях цикла уранового топлива.

Изучение факторов неопределенности указывает, что предложенные оценки запасов ВОУ и естественного урана лежат, как кажется, вблизи верхней и нижней границы соответствующих диапазонов<sup>53</sup>. Для более точных оценок следует подождать уточненных данных об истории операций с расщепляющимися материалами в Советском Союзе и России.

#### ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Решение о начале производства было принято в 1942 г. Но к 1945 г. предприятие добыло только 7 тонн. Этого было мало даже для первого экспериментального реактора Ф-1, производившего плутоний в Курчатовском институте; потребности в уране для этого реактора были покрыты запасом в 100 тонн, который захватили в поверженной Германии.
2. Общая производительность советского комплекса по добыче урана составляла 17 900 тонн (Robin Bhar, "Uranium: from Ore to Concentrate", *UI Briefing*, No. 93/6, The Uranium Institute, 1993). Кроме того, несколько тысяч тонн в год ввозилось из стран Восточной Европы.
3. В 1992 г. бывшие советские производители добыли 11 020 тонн (Robin Bhar, "Uranium: from Ore to Concentrate", *UI Briefing*, No. 93/6, The Uranium Institute, 1993). О сокращении выхода урана на 40-50% с предприятий казахстанских комплексов за период 1988-1991 гг. говорится в работе В.Пономарева "The Nuclear Industry in Kazakhstan and Kyrgyzstan", *Central Asia Monitor*, No.3, 1993, pp. 33-34.
4. "Report on the OECD NEA Uranium Group Mission to the USSR", OECD, 1991, p. 20. Эксперты OECD отмечают, что это могло бы оказаться преувеличением.
5. "Review of Wismut Reclamation", *UX Weekly*, vol. 9, issue 33, p. 4.
6. *The Global Uranium Market: Supply and Demand 1992-2010*, Uranium Institute, June 1994, pp. 44-45.

7. В период 1945-1994 г. в Болгарии было добыто 25 060 тонн (сообщение Джеффа Комбса, сентябрь 1995 г.). В последние годы темпы производства не превышали 100 тонн/год.
8. Полное производство в период 1989-1992 г. составило 549 тонн (сообщение сотрудников Международной ассоциации по ядерному страхованию, сентябрь 1995 г.).
9. Некоторые оценки приводят к величине общего производства 740 000 тонн естественного урана (J. Stein, "World Uranium Stockpiles: Potential Impact", доклад на международном семинаре по урановому топливу в Beaver Creek, Colorado, September 25-28, 1994).
10. Большая часть урана добывалась в открытых месторождениях и подземных шахтах, а затем руда измельчалась в процессе выщелачивания в отвалах или щелочного выщелачивания с дальнейшей очисткой урана ионно-обменными смолами. По состоянию на 1992 г. только 9% всей выработки (примерно 250 тонн) было связано с операциями выщелачивания на месте. В настоящее время подземная добыча прекращена.
11. По другим оценкам предполагается, что Соединенные Штаты и Россия произвели 125 тонн плутония. В этих оценках учитываются перерывы на замену и ремонт, уменьшение производительности отдельных реакторов и другие факторы, приводящие к уменьшению эффективности операции (А.Дьяков, "Использование уже выделенного плутония в России и проблемы международной безопасности: рассмотрение краткосрочных и долгосрочных вариантов" доклад, представленный на конференцию GLOBAL, Париж, сентябрь 1995 г. (не опубликовано).
12. Пять графитовых реакторов было построено в Челябинске-65 ("Маяк"), три - в Красноярске-26 и пять - в Томске-7.
13. В соответствии с "Соглашением между правительством Соединенных Штатов Америки и правительством Российской Федерации по закрытию реакторов, производящих плутоний, и прекращению использования плутония в ядерном оружии", подписанным вице-президентом США Гором и премьер-министром России Черномырдиным 23 июня 1994 г., Россия согласилась закрыть навсегда не позднее 2000 г. все свои 13 реакторов по производству плутония с графитовым замедлителем (Т.Кохрэн, Р.С.Норрис и О.Бухарин, "Создание русской бомбы: от Сталина до Ельцина", 1995 г., стр.27). Но реакторы в Красноярске-26 (один) и Томске-7 (два) могут продолжать работать и после 2000 г., пока не появятся заменяющие их источники тепла и электроэнергии, В октябре 1994 г. Россия прекратила использовать свежий плутоний для оружия; в настоящее время плутоний переводится в оксид и помещается на хранение.
14. Реакторы произвели электроэнергию в количестве 187 868 000 и 11 279 000 МВт-дней за периоды по 1988 г. и 1989-1990 гг. Реактор на 2000 МВт потребляет 1200 тонн урана в год ("Доклад рабочей группы по ядерным реакторам", американо-российская встреча по российским реакторам для производства плутония, 16 марта 1994 г.). Если коэффициент использования реактора равен 0.8, потребности в топливе составят 386 000 и 23 000 тонн до и после 1989 г., соответственно. Считается, что потери при изготовлении топлива составляют 1%. Данные по производству электроэнергии взяты из книги Кохрэна, Норриса и Бухарина, "Создание русской бомбы: от Сталина до Ельцина", 1995 г., стр. 134-137.
15. Предполагается, что выгорание топлива равно 400 Мвт-дней/тонна. Изотопный состав переработанного урана таков: U-232 - 1.382E-16, U-233 - 5.597E-17, U-234 - 2.137E-09, U-235 - 6.668E-03, U-236 - 7.470E-05 и U-238 - 9.333E-01. (Сообщение Тома Кохрэна, 11 апреля 1995 г.. Данные получены при компьютерном моделировании.)
16. Добавочные 23 000 тонны (0.667% U-235), регенерированные после 1988 г., вероятно, были заново обогащены и использованы вторично либо заложены на хранение.
17. Подводные лодки первого и второго поколений использовали уран с обогащением около 21%; подлодки третьего поколения движутся реакторами с двумя-тремя зонами обогащения, степень которого меняется от 21 до 45% U-235. Отдельные подлодки и ледоколы пользуются 90%-ным ураном.
18. В одной топливной сборке реактора второго поколения типа ВМ-4А содержится 1.4 кг 20%-ного урана. (O. Vucharin and W. Potter, "Potatoes are Guarded Better", The Bulletin of the Atomic Scientists, May/June 1995, pp. 46-50.) В типичной активной зоне находится 225 топливных сборок (В.Курносос и В.Перовский, "Об улучшении системы управления отработанным топливом на российских военно-морских предприятиях", доклад на семинаре НАТО в Москве, июнь 1995 г.). Итак, в активной зоне реактора находится 315 кг урана.
19. Использование переработанного урана (регенерированного из естественного уранового топлива реакторов по производству плутония) сократило бы потребности в естественном уране для морских программ. Впрочем, расчеты запасов ВОУ очень мало зависят от этого фактора.
20. Завод обрабатывает топливо реакторов ВВЭР-440 и БН-600, корабельных и исследовательских реакторов и ВОУ-топливо реакторов по производству плутония и трития. Продуктом завода РТ-1 служит т.н. урановый "плав" (урановая соль азотной кислоты) с обогащением 2.0-2.5% по U-235. Для достижения требуемой степени обогащения материал смешивается на РТ-1 с раствором ВОУ. Степень обогащения можно было отрегулировать также на заводе по производству топлива в Усть-Каменогорске. (Ю. Бибилашвили и Ф. Решетников, "Цикл ядерного топлива на реакторах ВВЭР, РБМК и БН в России", Известия вузов, № 2-3, 1994 г., стр.55-65.)
21. Процесс не получил лицензии для промышленного применения и топливный завод в Усть-Каменогорске где-то в 1992 г. прекратил пользоваться переработанным ураном. Основная проблема состоит в повышенном облучении персонала из-за присутствия в уране продуктов распада U-232 с проникающим гамма-излучением.
22. Из трех реакторов по производству плутония с мощностью по 2000 МВт ежегодно выгружается 3535 тонн 0.667%-ного урана. В 1992 г. завод РТ-1 обработал 120 тонн отработанного топлива, главным образом, от реакторов ВВЭР-440 и регенерировал 114 тонн урана с обогащением 1.25%. (Кохрэн, Норрис и Бухарин, "Создание русской бомбы: от Сталина до Ельцина", 1995 г., стр.27.)
23. Сообщение представителя российской ядерной промышленности (май 1995 г.).
24. О.Бухарин, "Взаимосвязь военного и гражданского циклов ядерного топлива в России", Наука и всеобщая безопасность, т.4, № 3, 1994 г., стр. 62-71.
25. Россия покрывает на 100% потребности Литвы и Казахстана в уране (298 и 80 тонн/год), а также урановый дефицит Украины (700 тонн/год) и Восточной Европы (300 тонн/год). ("Программа развития ядерной энергии в Российской Федерации на период до 2010 г.", Москва: Минатом, 1992 г.)
26. В 1992 г. почти 40% обогатительного потенциала Минатома были направлены на обогащение отходов (Ю. Бибилашвили и Ф. Решетников, "Цикл ядерного топлива на реакторах ВВЭР, РБМК и БН в России", Известия вузов, № 2-3, 1994 г., стр.55-65). Как сообщают источники из российской ядерной промышленности, урановые отходы обеднены до 0.11% по U-235. Если допустить, что уран обогащается от 0.3% (см. ниже) до 0.7% по U-235, а свободный обогатительный потенциал составляет 8 миллионов SWU/год, можно оценить, что в 1992 г. произведено такое количество урана, которое эквивалентно 6300 тоннам естественного урана.
27. Дополнительные 23 000 тонн могли быть переправлены в Западную Европу, но не доставлены производителям электроэнергии (сообщение Дж.Стайна, 24 апреля 1995 г.).
28. Заявление В.Ф.Петровского - заместителя руководителя советской делегации на 44-ой сессии Генеральной Ассамблеи ООН, 25 октября 1989 г. В заявлении говорится, что "в этом году производство высокообогащенного урана прекращено". Но, как считается, СССР фактически прекратил производство ВОУ для оружия где-то в 1988 г.
29. В 1950 г. газово-диффузионный завод Д-1 в Свердловске-44 начал производство ВОУ в объеме нескольких десятков кг/год. Завод вошел в строй в 1949 г., но не вырабатывал заметных количеств обогащенного урана до 1959 г. из-за многочисленных технических трудностей.
30. Первый промышленный обогатительный завод на центрифугах был готов к производству в Свердловске-44 в 1962 г.



31. Последний газово-диффузионный завод был закрыт в Томске-7 в 1991 г.
32. Информация об увеличении обогатительного потенциала в 2.4 раза взята из книги Е.Микерина, В.Баженова и Г.Соловьева "Направления развития обогатительной технологии урана", 1993 г.
33. D. Albright, F. Berkhout, W. Walker, "World Inventory of Plutonium and Highly Enriched Uranium", SIPRI (New York, Oxford University Press, 1993), p. 60.
34. "Линейное" предположение может привести к переоценке полных затрат SWU. Если следовать Д. Олбрайту, который принял во внимание логику производства и разветвления центрифуг разных поколений, полные затраты SWU в СССР по 1987 г. можно оценить в 282-284 миллионов (частное сообщение, весна 1995 г.).
35. Потребности в БОУ могут заметно меняться в зависимости от типа боеголовки. Типичный вторичный компонент термоядерной боеголовки может содержать 15 кг БОУ или более; в артиллерийском снаряде ствольного типа можно использовать 50 кг БОУ. Степень обогащения БОУ также различна у разных типов боеголовок. Как сообщают, во многих российских боеголовках используется уран с обогащением 36-98%.
36. Судя по оценкам ЦРУ (май 1992 г.), российский запас во время составлял 30 000 плюс-минус 5 000 боеголовок. (Слушания перед Комитетом по ассигнованиям Палаты представителей Конгресса США, Ассигнования МО на 1993 г., часть 5, 6 мая 1992 г., стр.499.) Россия продолжает демонтировать оружие со скоростью 1500-2000 единиц в год.
37. В соответствии с заявлением Ельцина-Буша от 17 июня 1992 г. стратегические арсеналы обеих стран будут сокращены до 3000-5000 боеголовок к 2003 г. и окажутся, примерно, соответствующими проектируемому по Договору СНВ-2 уровням ядерных сил. ("Joint Understanding", Arms Control Today, 6/92, p. 33.) У России будет запас резервных и тактических боеголовок.
38. Это соответствует доле БОУ в энерговыделении всей активной зоны реактора порядка 8%.
39. Производство трития в Челябинске-65 началось в начале 50-х г. на производившем плутоний реакторе АВ-3 с графитовым замедлителем. Примерно, в 1954 г. производство трития началось на 100 МВт-ном тяжеловодном реакторе (ТВР) ОК-180, который был запущен в Челябинске-65 в 1951 г. Второй ТВР (ОК-190) начал работать в 1955 г. Первый ТВР был остановлен в 1965 г. и заменен легководным реактором "Руслан" на 1000 МВт, который начал работу в 1979 г. Второй ТВР ОК-190 был усовершенствован в 1965-66 гг. и работал до 1986 г. Его заменил 1000 МВт-ный легководный реактор "Людмила". "Руслан" и "Людмила" используются для производства трития, других изотопов (Pu-238, Co-60, C-14 и др.) и для облучения кремниевых стержней.
40. Кохрэн и др., стр.137.
41. Деление 1.05 г U-235 эквивалентно 1 Мвт-дню.
42. В их число входят семь одиночных жидкометаллических реакторов на подлодках класса "Альфа", два жидкометаллических реактора на подлодке класса "Ноябрь", два водяных реактора под давлением (ВРД) на корабле С31, а также пять спаренных и три одиночных ВРД на ледоколах.
43. В предположении, что имеется 100 активных реакторных зон (в каждой содержится 200 кг БОУ).
44. Из них 6 реакторов, 4 критические сборки и 1 подкритическая сборка сооружаются; 14 установок сняты с эксплуатации.
45. В 1992 г. Е.Микерин указал, что 1.5 тонны БОУ ежегодно использовались для производства топлива исследовательских и корабельных реакторов. При таких темпах за 30-ти летний период использовано 45 тонн БОУ. Если 20 тонн использовали для корабельных реакторов, то на долю исследовательских остается 25 тонн.
46. Из 1100 взрывов у 1000 мощность превышала одну тонну и они считаются за 718 ядерных испытаний. (Т. Cochran and С. Paine, "The Role of Hydronuclear Tests and Other Low-Yield Explosions and Their Status under a Comprehensive Test Ban", NRDC, Nuclear Weapons Databook, March 1995, p. 21.)
47. Сюда входят 3500 тонн, регенерированных из трех реакторов для производства плутония, которые были закрыты в 1992 г.
48. Создаваемый в реакторе изотоп U-232 является проблемой с точки зрения профессиональной безопасности, поскольку он превращается в Bi-212 и Tl-208, которые испускают гамма-лучи высокой энергии. Изотоп U-236, также образуемый в реакторах при захвате нейтронов ядра U-235, является сильным поглотителем нейтронов ("ядом"). В переработанном уране могут быть загрязнения в виде следов продуктов деления и трансурановых элементов. Дополнительное загрязнение плутонием может произойти в БОУ, используемом в боеголовках сложного состава, в связи с взаимной диффузией урана и плутония. БОУ может также оказаться загрязненным легирующими металлами и химическими примесями.
49. Замечания Е.Микерина на международном семинаре по урановому топливу, 8-11 октября 1995 г., Институт ядерной энергии, Виллиамсбург, Вирджиния, США.
50. Разбавление ураном с более высокой степенью обогащения приводит к большему количеству конечного продукта и увеличивает таким образом фактор разбавления.
51. Изотоп U-234 - это естественный урановый изотоп. Но так как он является сильным альфа-излучателем, имеются ограничения на его концентрацию в уране коммерческого качества. Концентрация U-234 в БОУ увеличена из-за более предпочтительного обогащения этого изотопа по сравнению с U-235.
52. Е.Микерин, "Промышленный процесс разбавления российского БОУ из оружия до НОУ", доклад на международном семинаре по урановому топливу, 8-11 октября 1995 г., Институт ядерной энергии, Виллиамсбург, Вирджиния, США.
53. Оцененный запас в 1300 тонн БОУ превосходит величину 1250 тонн, предложенную В.Михайловым. ("Behind the HEU Curtain: A Critical Review of the Atomic Armistice", Nukem Market Report, October 1993, p. 5)
54. Потребность в топливе и степень обогащения взяты из работы D. Bradley, K. Schneider, "Radioactive Waste Management in the USSR: A Review of the Unclassified Sources, 1963-1990", PNL Volume 1, March 1990, p. 6.3.