

ПРОИЗВОДСТВО ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО УРАНА ДЛЯ ЮЖНО-АФРИКАНСКОГО ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

Томас Б. Кохрен

Мы оценили, что Южная Африка произвела 735 ± 53 килограммов 90-процентного эквивалента высокообогащенного урана (ВОУ). Это количество, если оно обогащено до 80 или 90 процентов, могло быть использовано для создания 12 бомб на реакции деления хиросимского типа. Правительство Южной Африки утверждает, что оно создало только шесть таких устройств и никогда не собиралось создавать более семи. Излишек ВОУ был по-видимому менее обогащенным, чем хотелось бы Южной Африке для своего оружия, но вероятно все-же пригодным для создания оружия. По-видимому, в то время, когда программа ядерного оружия была прекращена в 1989 году, всюду велись исследования устройств имплозивного типа. Если бы эти усилия продолжались, в конечном итоге Южная Африка оказалась бы способной создать в четыре раза больше оружия с тем же самым количеством делящегося вещества. Из-за неопределенности в 15,6 процентов при анализе отходов (два стандартных отклонения) количество урана-235 при производстве ВОУ оценивается с точностью 256 килограммов. В интересах всех сторон уменьшить эту неопределенность.

Автор работает в Совете по защите природных ресурсов, Вашингтон, округ Колумбия, США.

ВВЕДЕНИЕ

Южная Африка решила создать программу ядерного оружия в 1974 году. Первая из шести атомных бомб пушечного типа была создана из высокообогащенного урана, произведенного в Южной Африке. В 1989 году Южная Африка решила присоединиться к Договору о нераспространении ядерного оружия и демонтировала свою программу ядерных вооружений. После этого должностные лица Южной Африки представили Международному агентству по атомной энергии (МАГАТЭ) обширные данные по деятельности своих обогатительных предприятий, но они утверждали, что не в интересах нераспространения публично раскрывать количество произведенного или находящегося на руках ВОУ, потому что оно хранится в одном месте. Поскольку Южная Африка уже объявила, что хранимого материала хватит, по крайней мере, на шесть бомб, вряд ли имеет смысл держать в секрете, сколько еще материала находится на руках. Но более важно выяснить полное понимание неопределенностей при подсчете материала. В этой статье мы оцениваем, сколько было произведено оружейного материала, и начинаем с краткого обзора истории южно-африканской ядерной программы.

ИСТОРИЯ ЮЖНО-АФРИКАНСКОЙ ЯДЕРНОЙ ПРОГРАММЫ¹

Вовлечение Южной Африки на ядерную арену началось в 1944 году, когда британское правительство попросило Южную Африку провести инспекцию своих урановых залежей. В 1948 году парламентским актом был создан Совет по атомной энергии для контроля над производством и продажей урана, главным образом, Объединенному агентству по разработке - скупочной организации, созданной Соединенными Штатами и Британией, чтобы обеспечить ураном свои национальные программы ядерных вооружений². Обладая обширными урановыми ресурсами, Южная Африка к 1955 году имела 19 действующих шахт и 12 горнодобывающих заводов³. В 1957 году Южная Африка приняла участие в организации МАГАТЭ и ей было предоставлено постоянное место в Совете

управляющих, как стране с "наиболее продвинутой" ядерной программой в своем регионе⁴. Соединенные Штаты и Южная Африка подписали соглашение о ядерном сотрудничестве в том же самом году и вскоре после этого Южная Африка начала гражданскую ядерную исследовательскую программу, поначалу сконцентрированную на разработке спроектированного у себя реактора для производства электроэнергии, а также потенциала для обогащения урана⁵. Проект реактора-электростанции был приостановлен через короткое время из-за недостатка ресурсов⁵. В рамках соглашения о ядерном сотрудничестве 1957 года Соединенные Штаты продали Южной Африке исследовательский реактор с тепловой мощностью 5 МВт, загружаемый ВОУ и названный Сафари-I. Его сооружение началось в 1961 году в Национальном центре ядерных исследований в Пелиндабе вблизи Претории, а в 1965 году он начал действовать под контролем МАГАТЭ.

В 1967 году Южная Африка подготовила второй, менее крупный реактор Пелундуна-0 (Сафари-II) на низкообогащенном уране (НОУ) и тяжелой воде. Он также был под контролем МАГАТЭ. Соединенные Штаты снабдили его 606 килограммами урана с обогащением 2 процента до того, как реактор разукомплектовали⁶.

Желая придать больше ценности экспортируемому урану, в 1967 году правительство официально приняло секретное решение о начале обогатительного проекта⁵. На следующий год Южная Африка отказалась подписать только что подготовленный Договор о нераспространении, высказав обычный аргумент, что договор не заставляет ядерные державы сократить свои арсеналы, а также выразив озабоченность о влиянии договора на коммерческие аспекты ядерной энергии в Южной Африке⁷. В 1970 году была создана контролируемая государством Корпорация по обогащению урана (КОУ) для сооружения в районе Валиндаба близ Пелиндабы обогатительного завода⁵, а в июле того же года премьер-министр Джон Форстер объявил в парламенте, что южно-африканский Совет по атомной энергии успешно разработал новый "концептуально уникальный" процесс обогащения урана⁸. В 1971 году началось сооруже-

ние опытного обогатительного завода (У-завод), основанного на технологии сверхзвукового истечения газа из сопла.

В марте 1971 года Министерство горного дела одобрило исследовательскую работу по мирным ядерным взрывам для горнодобывающей промышленности. Ответственность за разработку и производство взяла на себя Корпорация по атомной энергии (КАЭ) Южной Африки⁹.

В 1974 году правительство Южной Африки официально решило стремиться к ограниченному ядерному сдерживанию¹⁰, поскольку его безопасности стали угрожать провозглашенная странами Варшавского пакта политика распространения своего влияния на южную часть Африки и появление кубинских войск в Анголе. Корпус 5000 в Пелиндабе был, по видимому, местом начального изготовления ядерного оружия¹¹. В 1974 году было одобрено создание испытательного ядерного полигона в пустыне Калахари, а в конце года были укомплектованы первые ступени в начале обогатительного каскада на У-заводе¹². Южная Африка отказалась поместить их под контроль МАГАТЭ.

В ответ на создание Южной Африкой завода в Валиндабе президент Форд под сильным давлением со стороны конгресса прекратил экспорт топлива для Сафары-1 в начале 1975 года. Последний раз топливо было вывезено из США в ноябре 1975 года. К 1977 году уровень мощности на Сафары-1 был снижен с 20 до 5 МВт, чтобы сохранить топливо⁵. В 1975 году президент Совета по атомной энергии Южной Африки А.Дж.А. Руа объявил, что его страна построит коммерческий обогатительный завод, большая часть продукции которого предназначается для экспорта¹³. Однако, к 1978 году было принято решение создать не столь большую установку, способную, как было сказано, производить 75 тонн НОУ ежегодно; это все-таки превышало на 50 процентов то, что требовалось для перезагрузки двух ядерных электростанций типа Коберг, купленных у Франции в 1975 году¹⁴. В 1979 году Южная Африка объявила об успешной разработке топлива с обогащением 45 процентов для реактора Сафары-1. Начиная с этого времени, Южная Африка поставляла для Сафары-1 свое собственное топливо⁵.

На полигоне в Калахари были пробурены в демонстрационных целях три скважины на глубину 180-200 метров. Одну забросили из-за геологических условий. Две другие были завершены в 1977 году¹⁵. Советский Союз 6 августа 1977 года обратил внимание Соединенных Штатов на строительную активность на полигоне в Калахари. Обширное давление со стороны сверхдержав - Соединенных Штатов, Франции, Великобритании и Западной Германии, вынудило Южную Африку забросить полигон. Скважины в Калахари инспектировались еще раз в 1987 году в ответ на успехи кубинцев в Анголе⁵.

В марте 1977 года У-завод впервые заработал как единый каскад⁵; первые относительно малые количества ВОУ были выведены в январе 1978 года¹⁶. До конца 1978 года было произведено достаточное количество ВОУ для превращения его в металл, переплавки и обработки на станках, чтобы получить детали оружия и собрать их в первую атомную бомбу⁵. Уран был относительно нечистым и обогащен изотопом U-235 только примерно на 80 процентов. Впоследствии этот уран был удален и переработан на

обогатительном заводе для очистки и повышения степени обогащения⁵. В 1979 году руководство правительства приняло решение о том, что государственная компания по изготовлению оружия Армскор должна взять на себя производство ядерных устройств, а роль КАЭ ограничивалась обогащением урана и некоторыми расчетами в области нейтронной физики⁵. В том же году был произведен ВОУ для второй атомной бомбы⁵. В 1980 году начала подготавливаться Адвена (секретное предприятие Армскора в округе Кентрон, в 35 километрах к западу от Претории, где была проведена большая часть последующих работ по оружию), сооружение которой было завершено на следующий год⁵. В 1985 году правительство решило ограничить размер своего ядерного арсенала семью атомными бомбами⁵.

Авария в августе 1979 года, вызванная реакцией между двумя газами, использовавшимися в процессе обогащения - гексафторидом урана (UF₆) и водородом, привела к остановке завода У до апреля 1980 года, когда он возобновил работу². В июле началось поступление ВОУ. В том же году Южная Африка заявила об успешной разработке обогащенного до 45 процентов топлива для реактора Сафары-1. С этого времени Южная Африка поставляла для Сафары-1 свое собственное топливо⁵.

Весь южно-африканский ВОУ был произведен на заводе У. Сооружение второго обогатительного предприятия - полукоммерческого завода Z, началось в 1979 году. Он был заложен в 1984 году и произвел первый НОУ в августе 1988 года⁵. Завод Z имел 56 модулей, в каждом из которых находилось примерно 500 000 разделительных элементов, и был так сконструирован, что степень обогащения была ограничена уровнем чуть ниже пяти процентов U-235⁷. В конце 1991 года этот завод мог бы работать на максимальной мощности, эквивалентной 300 000 единицам работы разделения (SWU) в год¹⁸. Он использовался исключительно для производства НОУ, обеспечивая топливо для двух энергореакторов Коберг, запущенных в июле 1984 года и ноябре 1985 года.

Между июнем и декабрем 1986 года завод У перешел на производство урана с обогащением 3,25 процента для первых четырех показательных опытных сборок, предназначенных для реакторов-близнецов Коберг с электрической мощностью 922 МВт⁵. В дальнейшем он производил ВОУ до прекращения работ 1 февраля 1990 года².

В сентябре 1989 года сразу после прихода к власти президент Фредерик Де Клерк приказал приостановить программу ядерных вооружений. Были составлены соответствующие планы и 26 февраля 1990 года президент Де Клерк отдал письменные указания начать демонтаж². На следующий день были даны указания демонтировать шесть собранных атомных бомб, уничтожить неядерные компоненты и техническую документацию, провести переучет ВОУ и вернуть его Корпорации по атомной энергии, а также уничтожить установку Армскора до присоединения к Договору о нераспространении⁵. Как уже отмечалось выше, завод У прекратил работу 1 февраля 1990 года. В начале июля 1991 года была демонтирована последняя бомба. Установка Армскора была обезврежена, возвращена КАЭ и переведена на производство медицинское оборудования⁵. Южная Африка присоединилась к Договору о нераспространении 10 июля 1991 года, подписала 16 сентября того

Основные этапы эксплуатации завода Y

- 1971 - Началось сооружение.
- 1974 - К концу года заложены первые четыре начальные ступени каскада.
- 1977 - В марте началась полномасштабная работа всего завода.
- 1978 - В январе получен первый ВОУ, а к концу года - достаточное количество 80-ти процентного урана для первой атомной бомбы.
- 1979 - В августе производство остановилось.
- 1980 - В апреле производство возобновилось.
- 1981 - В июле возобновилось получение ВОУ.
- 1986 - С июня по декабрь завод был переориентирован на производство НОУ (топливо для реакторов Коберг с обогащением 3,25 процента).
- 1990 - С 1 февраля завод прекратил производство.

же года соглашение с МАГАТЭ о постоянном контроле и охране и предоставила МАГАТЭ список ядерных материалов и установок 30 октября 1991 года.

ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВА ВОУ

Как уже отмечалось, южно-африканские должностные лица публично обнародовали некоторые дополнительные данные, относящиеся к операциям по обогащению, но не к полному количеству ВОУ, произведенного для оружия. Мы можем оценить последнюю величину, используя уравнения, которые связывают количества поступающего на обогатительный завод сырья, обогащенного продукта, обедненного урана в отходах, а также производительность разделительных устройств¹⁹.

За 15 лет своей рабочей истории (с конца 1974 года до 1 февраля 1990 года) завод Y все еще работал на полную мощность в течение первых 27 месяцев (с конца 1974 до марта 1977 года), а затем вышел на равновесный уровень производства, но не выпускал ВОУ в течение двух периодов общей длительностью 25 месяцев (март 1977 - январь 1978 и апрель 1980 - июль 1981); в течение шести месяцев производил НОУ (июнь-декабрь 1986 года); был закрыт на восемь месяцев (август 1979 - апрель 1980); снова производил ВОУ в течение 115,5 месяцев (январь 1978 - август 1979, июль 1981 - июнь 1986 и декабрь 1986 - 1 февраля 1990 годов). За первые 10 месяцев (или что-то в таком роде) производства ВОУ темпы производства были низкими, а в начале 1980 года малая доля произведенного ВОУ была использована для подпитки реактора Сафари.

Южно-африканская КАЭ публично раскрыла данные по количественному содержанию U-235 в естественном урановом сырье (X_F) (оно не отличается от большинства урановых источников по всему миру), по усредненному анализу обедненного урана в отходах (X_T) и его неопределенности (одно стандартное отклонение) $\sigma[X_T]$, а также указала расчетные значения двух стандартных ошибок при оценке количества U-235 в ВОУ ($2\sigma[X_HH]$)²⁰:

- X_F = 0,00711 (т.е. 0,711 процента U-235)
- $X_T \pm \sigma[X_T]$ = 0,00456 \pm 0,00071
- $2\sigma[X_HH]$ = 526 килограмм.

Южно-американская КАЭ провела точные измерения количеств ВОУ и НОУ, а также содержания U-235 в каждом из них. Однако меньше внимания было уделено отходам с обедненным ураном. Они не были взвешены или проанализированы достаточно аккуратно. Отходы хранятся в виде UF_6 примерно в 600 цилиндрах, заполнявшихся слоями (примерно пять или шесть слоев на цилиндр). За время работы завода состав отходов менялся от 0,2 до 0,6 процентов U-235. Неопределенность анализа отходов является по этой причине основной по сравнению с неопределенностью в расчетном запасе ВОУ.

Начнем с уравнения баланса масс для всего урана и для U-235:

$$F = H + L + T \tag{1}$$

и

$$X_F F = X_H H + X_L L + X_T T \tag{2}$$

где F, H, L и T - загрузка, продукт ВОУ, продукт НОУ и отходы, соответственно, а X_i - соответствующие доли U-235. Подставляя уравнение (1) в уравнение (2) и определяя $X_H H$, получим:

$$X_H H = (X_H [(X_F - X_T)T - (X_L - X_F)L]) / (X_H - X_F) \tag{3}$$

Отметим по ходу, что если имеется только один продукт обогащения H, то уравнение (3) примет вид:

$$X_H H = X_H (X_F - X_T) T_H / (X_H - X_F) \tag{4}$$

Неопределенность величины $X_H H$ $\sigma[X_H H]$, можно получить из уравнения (3) на основе общего выражения²¹:

$$(\sigma[X_H H])^2 = \left(\frac{\partial X_H H}{\partial X_F}\right)^2 (\sigma[X_F])^2 + \left(\frac{\partial X_H H}{\partial X_T}\right)^2 (\sigma[X_T])^2 + \dots \tag{5}$$

Поскольку связанная с анализом отходов X_T неопределенность является доминирующей, уравнение (5) можно преобразовать к виду:

$$(\sigma[X_H H])^2 = (X_H T / (X_H - X_F))^2 (\sigma[X_T])^2 \tag{6}$$

Разделив квадратный корень из выражения (6) на уравнение (4), получим:

$$\sigma[X_{\text{HН}}]/X_{\text{HН}} = \sigma[X_{\text{T}}]T/[(X_{\text{F}}-X_{\text{T}})T_{\text{H}}] \quad (7)$$

что можно переписать в следующем виде:

$$X_{\text{HН}} = (\sigma[X_{\text{HН}}]/\sigma[X_{\text{T}}])(X_{\text{F}}-X_{\text{T}})T_{\text{H}}/T \quad (8)$$

Верхний предел количества U-235 в продукте ВОУ можно найти, положив $T_{\text{H}} = T$, что дает для $X_{\text{HН}}$ значение менее 945 килограммов. Позднее мы сможем увидеть, что $T_{\text{H}}/T = 0,796$, а в этом случае $X_{\text{HН}} = 752 \pm 256$ килограммов.

В ответ на сообщения прессы относительно попытки МАГАТЭ и правительства США согласовать данные по инвентаризации южно-африканская КАЭ публично сообщила, что расчетные два стандартных отклонения при оценке неопределенности содержания U-235 в ВОУ, то-есть $2\sigma[X_{\text{HН}}] = 526$ кг, более, чем в пять раз, превышает "фактическое противоречие"²². Не было бы проблемой, если бы то количество ВОУ, которое, судя по заявлению Южной Африки МАГАТЭ, находится на руках, оказалось меньше оцененной из уравнения баланса масс величины (с учетом отходов и других проверок). Другими словами, мы знаем знак противоречия; его величина меньше 105 кг (526/5) и вероятно больше 88 кг (526/6)²³. Таким образом, в соответствии с этими оценками, количество U-235 в продукте ВОУ, о котором Южная Африка вероятно сообщила МАГАТЭ, как о находящемся на руках, лежит между 647 и 664 килограммами.

Мы не знаем среднее значение X_{H} и, в действительности, весь ВОУ не имеет одно и то же содержание U-235. Тем не менее, можно преобразовать результаты к 90-процентному эквиваленту U-235 и в этом случае мы можем сказать, что Южная Африка получила ВОУ, эквивалентный производству 719-738 килограммов урана с 90-процентным обогащением.

Хотя официально это и не сообщалось, мы знаем из других источников оценку Южной Африки количества обедненного урана в о ходах от операций на заводе Y, а именно, 370 643 килограммов; мы используем эту величину в последующих расчетах. Она обеспечивает также полезную проверку справедливости наших предположений о том, что неопределенность состава отходов преобладает над другими неопределенностями, то-есть справедливость уравнения (6). Переписав уравнение (6), произведем оценку:

$$T = (\sigma[X_{\text{HН}}]/\sigma[X_{\text{T}}])(1 - X_{\text{F}}/X_{\text{H}}) = 367000 \text{ кг} \quad (9)$$

что хорошо согласуется с южно-африканской оценкой в 370 643 кг.

Количество произведенного ВОУ можно оценить непосредственно на основе учета отходов и состава загрузки, продукта и отходов. Чтобы сделать это, мы должны прежде всего вычесть количество отходов, связанных с начальным этапом разгонки завода, то-есть подвести завод к равновесному состоянию, а также с производством топлива для реакторов Сафари-I и двух Кобергов.

Вычитание отходов за период разгона. Во время разгона отходы выделяются раньше выделения продукта. Следовательно, некоторые отходы были произведены без сопутствующего продукта. Время достижения равновесия (или время разгона) при выделении продукта t_{P} определяется как период потери эквивалентной продукции во время приближения к

равновесному состоянию²⁴. Время приближения к равновесию при выделении отходов t_{T} определяется аналогично. Разница двух этих времен ($t_{\text{P}} - t_{\text{T}}$), умноженная на скорость производства отходов в равновесном состоянии дает количество отходов, произведенных за то время, пока не было сопутствующего продукта. Приблизительные уравнения для времен разгона были даны Бенедиктом, Пигфордом и Леви²⁵. Вот их приближение для t_{P} :

$$t_{\text{P}} = 8hf(X_{\text{F}}, X_{\text{P}})/(1-\alpha)^2 \quad (10)$$

где h - время задержки в одной ступени, которое определяется как время, требуемое для протекания материала через одну ступень; α - это фактор разделения ступени, а $f(X_{\text{F}}, X_{\text{P}})$ - функция состава продукта и отходов. Значение множителя $(1 - \alpha)$ для завода Y равно 0,027 или несколько выше, что на порядок величины выше, чем для процесса газовой диффузии - там $(1 - \alpha) = 0,003$ ²⁶. К сожалению, мы не знаем величины h для завода H. Американские специалисты по обогащению сказали нам, что она может быть весьма большой - больше, чем на газодиффузионном предприятии.

С учетом изложенной выше истории деятельности начальной разгонки завода Y составляло 10 месяцев (март 1977 - январь 1978), а второй разгон после аварии в 1979 году и ремонта составил 15 месяцев (апрель 1980 - июль 1981). Но мы не знаем, какая часть каждого периода связана с устранением технических дефектов, а какая - с эффективным разгонным временем. Кроме того мы не знаем, сколько содержавшегося в каскаде вещества было изъято после аварии 1979 года и затем переработано. Авария характеризовалась как "катастрофическая", что дает основание полагать, что значительная часть находившегося в каскаде материала не могла быть переработана. В отсутствие лучшей информации предположим, что эффективное время разгона составляло 7 ± 3 месяцев. Полные 14 ± 6 месяцев представляют около 10 процентов полного времени, в течение которого из каскада поступали только отбросы. Поэтому мы считаем, что $37\ 000 \pm 16\ 000$ килограммов отходов соответствовали такому периоду производства, когда вся обработка проходила внутри каскада, а продукт наружу не поступал.

Если бы завод Y полностью был занят производством ВОУ, то после разгона он мог произвести около 950 ± 50 килограммов урана, обогащенного до 90 процентов²⁷.

Подпитка реакторов Сафари-1 и Коберг. Сафари-I - это легководный исследовательский реактор бассейнового типа с бериллиевым отражателем, использующий в качестве топлива ВОУ; он в первый раз достиг критичности в марте 1965 года. Сначала его проектная мощность (тепловая) равнялась 6,67 МВт, но в испытательном режиме он обычно работал на мощности пять МВт. В 1969 году он был усовершенствован, так что при особых требованиях мощность можно было поднимать до 20 МВт. В топливной зоне находится 22-28 твэлов²⁸; критическая масса составляет 1,521 кг U-235; при работе на мощности 6,67 МВт загружается 3,604 кг U-235, а при 20 МВт - 3,357 кг (бериллиевый отражатель введен полностью). Соединенные Штаты поставили для реактора 87,8 кг урана с обогащением 93 процента (81,6 кг U-235) между 1965 годом и ноябрем 1976 года⁵.

Как отмечалось ранее, уровень мощности Сафари-1 был снова снижен до 5 МВт в 1977 году, а в 1981 году Южная Африка объявила, что производит материал с обогащением 45 процентов для Сафари-1, и после этого она обеспечивала все потребности Сафари-1 в топливе.

Мы оценили, что ежегодный расход топлива при работе на 5 МВт составляет 3,6 кг U-235²⁹, а при работе на 20 МВт - 11 кг U-235³⁰. Это наводит на мысль, что в период между 1969 и 1981 годами Сафари-1 мог работать на мощности, грубо говоря, 20 МВт в общей сложности в течение четырех лет без полного расходования топлива, поставленного Соединенными Штатами. Допустим, что 80 кг обогащенного до 45 процентов топлива (дополнительная десятилетняя подпитка работы Сафари-1 на мощности 5 МВт) было произведено на заводе Y после 1981 года, для чего понадобилось 6113 единиц работы разделения SWU и 13975 кг природного урана и после чего осталось 13895 кг отходов со степенью обогащения 0,456 процента³¹. Добавим 30 процентов неопределенности при такой оценке и мы получим, что 14000 ± 4200 кг отходов связаны с производством топлива для Сафари-1.

Два легководных энергетических реактора Коберг-1 и -2 с проектной мощностью 922 МВт (электрических) были запущены в 1984 году и в ноябре 1985 года, соответственно. В каждом из них содержится 72 тонны НОУ с 3,25-процентным содержанием U-235. Ежегодная подпитка топливом составляет 24 тонны для каждого реактора. Для этого Южная Африка закупила 130 тонн обогащенного до 3,25 процента НОУ в Бельгии и еще 130 тонн в Швейцарии. Начального бельгийского и швейцарского топлива хватило бы для двух сборок и подпитки в течение 4,8 лет. Дополнительные 60 тонн НОУ можно было закупить в дальнейшем в Китае³².

Каждая тонна НОУ с 3,25-процентным обогащением требует 10957 кг природного уранового сырья, 2962 SWU и оставляет 9957 кг отходов с 0,456-процентным обогащением³³. С другой стороны, одну тонну топлива с 3,25-процентным обогащением можно получить разбавлением 28,4 килограммов 90-процентного материала природным ураном или же разбавлением 31,2 килограммов 90-процентного материала обедненным ураном (0,456 процента U-235). В любом случае ясно, что за шесть месяцев, когда завод Y производил НОУ для подпитки реакторов Коберг, он не произвел ничего, близкого к одной годовой подпитки. С учетом того, что на каждую сборку пойдет 0,5 тонны топлива, потребности в топливе для четырех первых опытных сборок составят примерно две тонны.

В табл.1 мы оценили 90-процентный эквивалент оружейного продукта ВОУ, количество продукта с 45-процентным обогащением для питания реактора Сафари-1 и количество 3,25-процентного продукта для реакторов Коберг, которые были произведены на заводе Y. Мы предположили, что число SWU для каждой категории пропорционально времени операций, в течение которого был произведен данный продукт: 109,7 месяцев (90,6 процентов полного времени) на производство оружейного ВОУ, 5,3 месяца (4,4 процента полного времени) на производство топлива для Сафари-1 и шесть месяцев (5,0 процента полного времени) на производство топлива для реакторов Коберг.

Таким образом, из табл.1 можно оценить, что

было произведено 843 ± 52 килограммов ВОУ (758 ± 47 килограммов U-235)³⁴. Как и раньше, если расхождение в наличии U-235 составляет 88-102 килограммов, что эквивалентно 97-117 килограммам 90-процентного ВОУ, то количество ВОУ, которое Южная Африка, по-видимому, заявила МАГАТЭ как имеющееся в наличии, можно оценить в 735 ± 53 килограмма (662 ± 49 килограммов U-235).

РАЗЛИЧИЕ В СОДЕРЖАНИИ

КАЭ Южной Африки оценила относительную неопределенность (одно стандартное отклонение) при анализе отходов, равную 15,6 процентов³⁵. Эта и так уже большая ошибка при анализе отходов вызывает соответствующую относительную неопределенность в расчетном количестве продукта ВОУ, которая примерно в два раза выше - около 35 процентов³⁶. Уровень достоверности в 95 процентов (два стандартных отклонения) в расчетном содержании продукта ВОУ снова удваивается до ±70 процентов. Иными словами, при вычислении содержания ВОУ, которое должно бы оставаться на руках, чтобы сравнить его с тем, что фактически имеется в наличии, в лучшем случае мы могли бы сказать, что в ВОУ должно быть около 758 ± 526 килограммов U-235. Неопределенность выше двух третей наилучшей оценки.

По-видимому, правительство Южной Африки сообщило МАГАТЭ то количество U-235 в продукте ВОУ, которое у него есть в наличии. Мы оценили, что это около 662 килограммов U-235. Ясно, что более точное измерение при анализе отходов уменьшит неопределенность в 526 килограммов в расчетной величине и поэтому обеспечит дополнительную полезную информацию для оценки утверждения КАЭ Южной Африки, что у них есть все, что было произведено, а разница между двумя цифрами - 758 килограммами и 662 килограммами, лежит "в отходах". КАЭ Южной Африки подразумевает, конечно, что более тщательный анализ отходов приведет к их лучшей оценке и лучшей оценке количества ВОУ, ближе к тому, что, как сообщалось, находится на руках, и с меньшей неопределенностью оценки. Но с чисто статистической точки зрения уменьшение 15,6-процентной неопределенности в среднем анализе отходов и, следовательно, неопределенности в 526 килограммов в расчетных запасах U-235 может привести к средней оценке отходов, которая или повысится, или понизится; то же самое произойдет с запасом U-235 (его оценка либо повысится, либо понизится) и поэтому "фактическая расходимость" в запасах U-235 может столь же легко как увеличиться, так и уменьшиться. Сейчас только Южная Африка уверенно знает, какая разница запасов U-235 находится "в отходах" и был ли скрыт лишний ВОУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если бы завод Y производил ВОУ только для оружия, он бы смог дать около 950 килограммов 90-процентного обогащенного урана (860 кг U-235). Мы оцениваем, что примерно 6100 SWU было использовано для производства ВОУ-топлива для реактора Сафари: примерно 80 килограммов 45-процентного обогащенного топлива; еще 7400 SWU использованы для производства 2,5 тонн 3,25-процентного обогащенного урана для реакторов Коберг. Оставша-

Таблица 1

Оценки производства заводом У 90-процентного ВОУ для оружия, 45-процентного ВОУ для Сафари-I и 3,25-процентного НОУ для реакторов Коберг (в килограммах).

	Всего	U-235	SWU	Загрузка	Отходы
ВОУ (90% U-235)	843	758	133 415	295 880	295 038
ВОУ (45% U-235)	80	36	6 113	13 975	13 895
НОУ (3,25% U-235)	2 482	81	7 352	27 193	24 711
Итого	3 404	875	148 880	337 047	333 644

яся разделительная работа - 135 000 SWU была посвящена производству ВОУ. Мы оцениваем, что Южная Африка имела на руках ВОУ, эквивалентный 735 ± 53 килограммам 90-процентного обогащенного урана. Существует дополнительное расхождение в запасах, равное 88-105 килограммам U-235, которые, как утверждает правительство Южной Африки, находятся в отходах. Сброшенное Соединенными Штатами на Хиросиму ядерное устройство "Малыш" пушечного типа было сделано с использованием около 50 килограммов урана, обогащенного до, примерно, 80 процентов U-235 (это около 2,5 критических масс), и его мощность оценивалась в 12-15 килотонн³⁷. Оцениваемый диапазон мощностей южно-африканского оружия, как сообщается, лежит между 10 и 18 килотоннами³⁸. Мы не знаем относительной эффективности отражателя нейтронов в южно-африканской конструкции по сравнению с "Малышом". Следовательно, мы предполагаем, что могло потребоваться до 60 килограммов 90-процентного обогащенного урана для каждой из шести бомб пушечного типа, изготовленных Южной Африкой, и для седьмой, которая так и не была завершена. Было произведено достаточно ВОУ еще для пяти бомб такого же типа. КАЭ Южной Африки утверждает, что едва хватило ВОУ для шести бомб. Значит, избыток ВОУ, вероятно, не имел желаемой степени обогащения, но, возможно, мог использоваться для оружия. Кроме того, различие в запасах, или неучтенный материал, годится для еще двух атомных бомб. Эта разница может быть "в отходах", как утверждает южно-африканское правительство - отходы никогда не анализировались точно.

В то время, когда программа ядерного оружия была демонтирована, эксперты Армскора, по-видимому, работали над более сложным оружием имплозивного типа¹¹. Если предположить, что им удалось достичь двухкратного сжатия делящегося вещества, то при умеренном отражателе потребовалось бы только 12,5 килограммов U-235 для создания имплозивной бомбы с мощностью 20 килотонн³⁹. Если предположить далее, что весь пригодный для оружия ВОУ был обогащен до 90 процентов, то в конечном итоге Армскор смог бы создать арсенал, примерно, из 50 атомных бомб, использовав имеющиеся в наличии 735 килограммов ВОУ.

Следует приветствовать правительство Южной Африки за демонтаж своей ядерной программы и присоединение к Договору о нераспространении. В интересах всех сторон, включая и Южную Африку, попросить МАГАТЭ или США уменьшить неопределенность в 526 килограммов, относящуюся к разнице

запасов U-235 в ВОУ - это поможет решить все затянувшиеся вопросы о размещении южно-африканских военных материалов. Может быть, Соединенным Штатам следует принять предложение Южной Африки о проведении более точных измерений степени обогащения отходов.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Для более тщательного изучения истории южно-африканской ядерной программы обратитесь к следующим источникам: Leonard S. Spector, with Jaqueline R. Smith, *Nuclear Ambitions* (Boulder, Colorado: Westview Press, 1990); Leonard S. Spector, *Nuclear Proliferation Today* (New York: Vintage Books, A Division of Random House, 1984); and David Albright, Frans Berkhout, and William Walker, *World Inventory of Plutonium and Highly Enriched Uranium 1992* (Oxford: SIPRI and Oxford University Press, 1993).
2. Stumpf, "South Africa's Nuclear Weapons Programme," Atomic Energy Corporation of South Africa Ltd. 1993.
3. Spector, *Nuclear Proliferation Today*, p.280.
4. Spector, with Smith, *Nuclear Ambitions*, p.270. Президент Эйзенхауер заявил о начале программы "Атомы для мира" в речи в ООН 8 декабря 1953 года.
5. Waldo E. Stumpf, "South Africa's Limited Nuclear Deterrent Programme and the Dismantling Thereof Prior to South Africa's Accession to the Nuclear Non-Proliferation Treaty" - выступление в пристройке здания посольства Южной Африки в Вашингтоне 23 июля 1993 года. Д-р Штумпф - первый заместитель руководителя Корпорации по атомной энергии Южной Африки. Стенограмма его выступления выпущена посольством Южной Африки.
6. Spector, *Nuclear Proliferation Today*, p.281.
7. Spector, *Nuclear Proliferation Today*, p.283.
8. Spector, *Nuclear Proliferation Today*, p.284.
9. *The Arms Control Reporter*, May 1993, p.455. B.81.
10. Stumpf, "South Africa's Limited Nuclear Deterrence Program." Программа получила кодовое название "Крааль", что означает на местном языке каменный забор для ограждения скота. (*The Arms Control Reporter*, May 1993, p.455. B.77).
11. *The Arms Control Reporter*, May 1993, p.455. B.82.
12. Stumpf, "South Africa's Limited Nuclear Deter-

- gence Program." Завод Y использовал аэродинамический процесс разделения, похожий на то, что было разработано Беккером в Западной Германии. Более подробно он описан в книге Manson Benedict, Thomas Pigford, and Hans Levi, Nuclear Chemical Engineering (New York: McGraw-Hill Book Co., 1981) pp. 876-895. В отличие от некоторых сообщений, в нем не используется методика геликоновых каскадов, которая введена на заводе Z. "Валиндаба" - это зулусское слово, означающее "мы совсем не говорим об этом" (The Arms Control Reporter, May 1993, p.455. В.77).
13. Спектор (Nuclear Proliferation Today [New York: Vintage Books, 1984] p.290) цитирует утверждение Роберта Джастера ("Politics and the 'Africans' Bomb," Orbis, winter 1984, p.28) о словах Руа, который "объявил, что его страна создаст коммерческий завод, способный производить 5000 тонн низко обогащенного урана в год." Для производства 5000 тонн НОУ, обогащенного до 3,25 процента, при содержании в отходах 0,3 процента U-235 потребуется 20 миллионов SWU - это по порядку величины соответствует максимальному полному обогатительному потенциалу США. Если, как кажется более правдоподобным, намерение состояло в ежегодном обогащении урана, содержащегося в 5000 тоннах U_3O_8 , тогда потребовалось бы два миллиона SWU, чтобы произвести 540 тонн 3,25-процентного НОУ в год при 0,3-процентном содержании U-235 в отходах.
 14. Предыдущая ссылка и Spector, with Smith, Nuclear Ambitions, p.277.
 15. The Arms Control Reporter, May 1993, p.455. В.80.
 16. Stumpf, "South Africa's Nuclear Weapons Programme."
 17. Stumpf, "South Africa's Limited Nuclear Deterrence Program." На заводе Z также использовался аэродинамический (сверхзвуковое истечение из сопла) процесс и была внедрена геликоновая каскадная методика, позволяющая объединить несколько разделительных ступеней в один модуль. Подробности приведены в книге Benedict, Pigford, and Levi, Nuclear Chemical Engineering, pp.893-895.
 18. Albright, Berkhout, and Walker, World Inventory of Plutonium and Highly Enriched Uranium 1992, p.187.
 19. Развивая это положение, следует различать две величины: (а) заявленное количество имеющегося в наличии ВОУ - оно, по-видимому, было сообщено Южной Африкой МАГАТЭ и подлежит подтверждению прямыми измерениями; (б) южно-африканская оценка количества произведенного ВОУ, рассчитанная на основе уравнения баланса материалов, измеренных значений запасов продукта и отходов и анализа содержания U-235 в них. В другом варианте заявление (а) и оценку (б) можно выразить в единицах содержания U-235 в ВОУ - это будут, соответственно, (в) и (г). Поскольку Южная Африка публично не раскрыла величин (а)-(г) за исключением неопределенности (г), мы будем проводить собственные оценки (д)-(з) южно-африканских измерений и наилучших оценок (а)-(г). Каждая из наших наи-
 - лучших оценок обладает соответствующей неопределенностью.
 20. Stumpf, "South Africa's Limited Nuclear Deterrence Program". Величина $\sigma[X_{D,H}]$, вычисляется по измеренному продукту (отличному от ВОУ) и по количеству отходов и их составу. Здесь она непосредственно не измеряется.
 21. Смотрите, например, книгу Philip R. Bevington, Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences (New York: McGraw-Hill Book Co., 1969) p.60.
 22. Stumpf, "South Africa's Limited Nuclear Deterrence Program". Мы подразумеваем, что "фактическое расхождение" - это разница между содержанием U-235 в ВОУ, вычисленным по измеренным запасам и оценкам содержания U-235 в отходах, ломе и продуктах обогащения, отличных от оружейного ВОУ, и непосредственно измеренным количеством U-235 в имеющемся на руках ВОУ.
 23. Мы подразумеваем это, поскольку не было заявлено, что величина 526 килограммов более, чем в шесть раз, выше "фактического расхождения". Конечно, "фактическое расхождение" могло бы быть даже меньше, чем 88 килограммов.
 24. Benedict, Pigford, and Levi, Nuclear Chemical Engineering, pp. 678-679.
 25. Там же, уравнение (12.204) на стр.681 и уравнение (12.209) на стр.682.
 26. Там же, стр. 895.
 27. При производстве 953 килограммов обогащенного до 90 процентов продукта из природного уранового сырья остается 333 643 килограмма отходов с обогащением 0,456 процента, а всего 370 643 килограмма, поскольку 37000 килограммов связаны с периодами разгона.
 28. Центральная часть реактора имеет вид 8x9-решетки. В 1963 году сообщалось, что по проекту должно быть 22 твэла, 5 управляющих стержней, 22 бериллиевых отражателя и 23 алюминидовых фильтра; в информации МАГАТЭ "Исследовательские реакторы" данные по Сафари-1 приводятся с 1963 года. В 1990 году сообщалось, что у него 28 твэлов и 6 управляющих стержней ("One-Stop Irradiation Services from the Safari Material Test Reactor, Pelindaba, South Africa," Atomic Energy Corporation of South Africa, Limited, 1990).
 29. Мы предполагаем, что коэффициент использования равен 0,65, степень выгорания топлива 40%, а на 1 МВт-день расходуется 1,23 грамма U-235. Перемножив все эти множители, получим, что ежегодно сжигается 3,6 килограмма U-235, то-есть как раз то количество, которое содержится во всей реакторной сборке.
 30. Мы предполагаем, что коэффициент использования из-за дополнительных перезагрузок будет меньше 0,5. Поэтому после перемножения получаем ежегодный расход U-235 11,2 килограмма, что в 3,34 раза превышает его содержание в реакторной сборке.
 31. Если бы Сафари-1 работал на топливе, обогащенном до 90 процентов, потребовалась бы половина продукта - 40 килограммов. Для его производства пришлось бы затратить, примерно, столько же SWU и сырья и получить столько же отходов: 6428 SWU, 14046 килограммов сырья и

- 14006 килограммов отходов со степенью обогащения 0,456 процента, так что на наши расчеты это не повлияет. Некоторая часть 90-процентного продукта завода Y могла бы быть выпущена с запасом, в расчёте на подпитку Сафари-I в будущем. Но поскольку это мало будет отличаться от оружейного ВОУ, мы не обращаем внимания на такой вариант. Часть ВОУ от демонтированного сейчас оружия также могла бы быть резервирована для питания Сафари.
32. Марк Хиббс (Nuclear Fuel, 25 July 1988) сообщил, что посредник из Западной Германии договорился об экспорте из Китая в Южную Африку 30 тонн 3-процентного урана и 30 тонн 2,7-процентного урана в виде шестифтористого урана; Albright, Berkhout, and Walker, World Inventory of Plutonium and Highly Enriched Uranium 1992 (Oxford: SIPRI and Oxford University Press, 1993) p.189.
 33. При $X_P = 0,325$, $X_F = 0,00711$ и $X_T = 0,00456$ отношение загрузки к продукту (F/P) составляет 10,96, а отношение разделительной работы к продукту (SWU/P) равно 2,96 (напомним, что SWU измеряется в килограммах).
 34. В эту неопределенность включены: связанные с разгоном ± 16000 килограммов отходов, связанные с производством топлива для Сафари-I ± 4200 килограммов отходов и связанные с производством топлива для реакторов Коберг ± 7400 килограммов отходов.
 35. $0,00071/0,00456 = 0,1557$, где 0,00071 - одно стандартное отклонение (квадратной корень из расхождения), а 0,00456 - - наилучшая оценка анализа обогащения отходов.
 36. Найдено при подстановке данных из табл.1 в уравнение (7).
 37. Thomas B.Cochran, William M.Arkin, and Milton H.Hoenig, Nuclear Weapons Databook, Volume I: US Forces and Capabilities (Cambridge, Massachusetts: Ballinger Publishing Co., 1984) p.32.
 38. The Arms Control Reporter, May 1993, p.455.B.-78.
 39. Christopher E.Paine and Thomas B.Cochran, "Strengthening International Controls on Military Applications of Nuclear Energy," chapter 9 in Controlling the Atom in the 21th Century, edited by David P.O'Very, Christopher E.Paine, and Dan W.Reicher (Boulder, Colorado: Westview Press, in press).