

ОГРАНИЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАННЫХ ЗАПАСОВ УРАНА НА ПРОИЗВОДСТВО ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ В ПАКИСТАНЕ

Зиа Миан, А.Х. Найяр, Р. Раджараман

В этой статье рассматриваются возможные сценарии программ обогащения урана и производства плутония в Пакистане с конца 1970-х годов с использованием поставки природного урана в Пакистане в качестве ограничения. Поскольку международные санкции не позволяют Пакистану импортировать уран уже в течение нескольких десятилетий, он должен опираться на внутреннее производство урана, в настоящее время оцениваемого примерно в 40 тонн в год. В этой статье развитие пакистанских программ обогащения урана и производства плутония разделяется на три длительных периода: с конца 1970-х годов до ядерных испытаний 1998 года; с 1999 года до настоящего времени и с настоящего времени до 1999 года; и в ней рассматривается, как Пакистан может распределить свои ресурсы собственного урана между своими программами обогащения урана и производства плутония в каждом периоде. Эта оценка проводится для мощностей обогащения в диапазоне от 15000 до 75000 единиц работы разделения (ЕРР) и принимает во внимание строительство второго и третьего реакторов для производства плутония в Хушабе. Исследование показало, что в Пакистане имеется достаточно природного урана для изготовления топлива для всех трех реакторов, если тепловая мощность каждого из них будет составлять примерно 50 МВт, но для некоторых их обогатительных мощностей в 2020 году будет ощущаться недостаток природного урана. В статье рассматривается влияние альтернативных источников сырья для обогащения, таких, как обедненный уран от предыдущих работ по обогащению, и переработанный уран их отработанного топлива реакторов в Хушабе с малой степенью выгорания. Имеются признаки того, что в начале Пакистан мог иметь некоторое количество переработанного урана, возможно, полученного из Китая. В ней показано, что к 2020 году Пакистан может накопить примерно 450 кг плутония от реакторов в Хушабе и 2500 – 6000 кг высокообогащенного урана (ВОУ с 90 % обогащением) при мощностях обогащения в диапазоне от 15000 до 75000 ЕРР. Эти запасы будут, возможно, достаточны для изготовления 100 – 240 простых боеприпасов на делении на основе ВОУ и 90 боеприпасов из плутония. Пакистан сможет произвести больше боеприпасов, если он либо увеличит добычу природного урана, либо сконструирует более совершенные боеприпасы, для каждого из которых требуется меньше расщепляющихся материалов.

Зиа Миан работает в Программе по науке и всеобщей безопасности, Школа Вудро Вильсона по общественным и международным отношениям, Принстонский университет, Принстон, Нью-Джерси, США.

А.Х. Найяр работает в институте политики устойчивого развития, Исламабад, Пакистан.

Р. Раджараман работает в школе физических наук, Университет Джавахарлала Неру, Нью-Дели, Индия.

Статья получена 5 февраля 2009 года, исправлена 10 июля 2009 года, принята к публикации 18 марта 2009 года.

Почтовый адрес для корреспонденций: Zia Mian, Program on Science and Global Security, Woodrow Wilson School of Public and International Affairs, Princeton University, 221 Nassau St., Floor 2, Princeton, NJ 08542, USA.

Электронный адрес: zia@princeton.edu

ВВЕДЕНИЕ

Пакистан начал свою программу ядерных исследований и разработок в 1954 году, опираясь, как и многие другие страны, на техническое обучение и исследовательский реактор, предложенный Соединенными Штатами в части программы «Атомы для мира». Сейчас программа включает в себя полный цикл ядерного топлива, от добычи урана до обогащения урана, изготовления топлива, строительства и эксплуатации ядерных реакторов, и переработки отработанного ядерного топлива для извлечения плутония.

Гражданский компонент ядерной программы Пакистана, который находится под гарантиями Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), состоит из поставленного Канадой энергетического реактора на тяжелой воде мощностью 125 МВт-эл. вблизи Карачи (KANUPP) и проектированного и построенного Китаем легководного реактора в Чашма (CHAS-NUPP) мощностью 300 МВт-эл. Второй реактор такой же конструкции в настоящее время строится в Чашма.

По крайней мере с 1974 года, когда Индия провела первые испытания ядерного оружия, ядерный комплекс Пакистана обладал скрытой военной составляющей. Пакистан впервые испытал свое ядерное оружие в 1998 году; через две недели после этого Индия провела серию ядерных испытаний. Кроме этого, в общественной доступности имелась лишь весьма ограниченная официальная информация о программе ядерного оружия Пакистана. общепринято считать, что программа обогащения урана была начата в середине 1970-х годов в Кахута, и что Пакистан использовал технологию газовых центрифуг для производства высокообогащенного урана (VOU) для ядерного оружия. Однако, количество и производительность обогатительных заводов и центрифуг, которые использовались Пакистаном, включая возможную разработку нескольких поколений центрифуг, были довольно неопределенными на фоне противоречивых сообщений в литературе.

Аналогично, было общепризнано, что Пакистан построил и эксплуатировал промышленный реактор в Хушабе с конца 1990-х годов для производства плутония для ядерного оружия. Он также строит два дополнительных промышленных реактора на той же самой площадке, один из которых, как ожидается, должен начать работу в конце 2009 года. Однако, Пакистан не раскрыл проектную мощность ни одного из реакторов в Хушабе.

Имеется также очень немного официальной информации в отношении подробностей деятельности Пакистана по топливному циклу, такой, как добыча и обработка урана, изготовление топлива, и переработка, все из которых не находятся под гарантиями. В отсутствие такой информации, приходится полагаться на комбинацию суждений многих независимых аналитиков и сообщений средств массовой информации, дополняемых отрывочными заявлениями официальных лиц.

В этой статье исследуется, каким образом ограниченное внутреннее производство Урана в Пакистане может послужить для ограничения объемов и возможной эволюции его производственных мощностей и запасов расщепляющихся материалов. Поскольку Пакистан не публикует данных о производстве урана, статья опирается на оценки о внутреннем производстве урана в Пакистане, сообщаемые в полугодовых оценках ресурсов и производства урана во всем мире, Uranium Resources, Production and Demand, публикуемых Организацией международного сотрудничества и развития (ОЭСР) и Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) в отчетах, общеизвестных как «Красные книги»¹. В этой статье анализируются возможные сценарии для потребления урана в программе обогащения, мощности которой могут меняться со временем, и в качестве топлива для растущего числа промышленных реакторов. Вместе взятые, они позволяют построить связную картину программы в целом.

В следующем разделе статьи описывается доступность урана для ядерной программы Пакистана как из внутренних источников, так от импорта в течение ряда лет. В последующих разделах рассматриваются пути потребления урана, представляющие возможные сценарии эволюции производственных мощностей обогащения Пакистана, связанные с ними требования количества урана и текущие и будущие потребности в уране для промышленных реакторов в Хушабе.

В заключительном разделе предшествующий анализ возможных потоков урана используется для построения интегрированной картины военной программы Пакистана, связывающей его производственные возможности по обогащению урана и производству плутония. В нем также представлена обновленная оценка запасов расщепляющихся материалов в Пакистане и прогноз того, как эти запасы могут вырасти в будущем.

Существуют важные неопределенности в отношении того, какой статус программы производства расщепляющихся материалов будет иметь в Пакистане через десять лет. например, неясно, повредило ли серьезное землетрясение в октябре 2005 года пакистанские центрифуги в Кахута (предполагается, что повреждения, если они имелись, были исправлены без воздействия на производство) и вызовут ли будущие землетрясения более серьезные проблемы и потребуют ли они замены многих центрифуг.

Пакистан может также решить, что он произвел достаточно расщепляющихся материалов для того, чтобы удовлетворить свои военные требования: Соединенные Штаты, Россия, Великобритания, Франция и Китай уже закончили их производство, но Индия, Израиль и Северная Корея – нет². Возможно также, что, столкнувшись с ухудшающейся политической нестабильности и насилия, Пакистан может принять решение прекратить производство расщепляющихся материалов в качестве мероприятия по обеспечению безопасности. Возможно, более вероятно, что успешные переговоры по давно ожидаемому Договору о прекращении производства расщепляющихся материалов, который может запретить производство расщепляющихся материалов для оружия, Пакистан, несмотря на свои текущие опасения по поводу области действия такого договора, может оказаться неспособным противостоять международному давлению с требованием закончить свое производство расщепляющихся материалов для оружия, даже если он выберет не подписывать договор³. Ни Пакистан, ни Индия не проводили ядерных испытаний после 1998 года, хотя они и не подписали Договор о всеобъемлющем запрещении испытаний.

Имеются также технические и экономические аспекты поддержания и замены стареющей инфраструктуры и развития новых производственных мощностей. К 2020 году первоначальным пакистанским центрифугам будет более 40 лет, а любым новым мощностям, введенным в строй после ядерных испытаний 1998 года, так же как и реактору Хушаб-I, будет больше 20 лет. Также неясно, какими через 10 или 20 лет могут оказаться ресурсы урана и мощности по его добыче, поскольку «Красная книга» ОЭСР/МАГАТЭ только прогнозирует производство урана и спрос на него до 2030 года. По этим причинам настоящий анализ ограничивает прогнозы для производства расщепляющихся материалов для Пакистана 2020 годом⁴.

ПРОИЗВОДСТВО УРАНА В ПАКИСТАНЕ

В 1957 году пакистанская Комиссия по атомной энергии (ПКАЭ) начала исследование внутренних месторождений урана⁵. Уран был обнаружен Геологической службой Пакистана в 1959 году в Багалчоре (Багалчур) около Дера Гази Хан в южной части провинции Пенджаб⁶. качество руды в Багалчоре сначала описывалось как лежащее в интервале между 0.05 и 0.5 процентами, со средним содержанием урана примерно в 0.15 процента⁷. Позднее отчеты указывали на типичное качество в интервале от 0.03 до 0.1 процента и на распределение в форме линз до нескольких десятков метров длиной и менее нескольких метров толщиной, достигающих глубины более 150 метров⁸. Оценка 1980 года сообщенных запасов на 1976 год составляла 150 000 тонн руды с качеством не хуже 0.1 процента U_3O_8 , содержащей 181 тонну урана, без «прошлой добычи»⁹.

Согласно ПКАЭ, рудник и расположенная рядом урановая обогатительная фабрика открылись в 1977 – 78 годах¹⁰. Однако, крупномасштабная добыча в Багалчоре, по-видимому, началась после 1980 года, с сообщениями, что закупки оборудования, включая «погрузчики, краны и врубные машины» производились между 1980 и 1985 годами¹¹.

База данных информационной системы МАГАТЭ по ядерному топливному циклу (iNFCIS) сообщает, что обогатительная фабрика начала работать в 1978 году¹². Это могло отмечать старт первоначального периода деятельности пробного масштаба, описываемого в пакистанских отчетах как «мелкомасштабная деятельность по добыче и обработке на экспериментальной основе», с «малым заводом химической обработки с производительностью около полутонны руды в день .. удовлетворительно функционировавшим»¹³. Это соответствует темпам производства менее 200 кг в год для руды, содержащей 0.1 процента урана. Проектная мощность обогатительной фабрики, согласно различным отчетам, составляла либо 300 тонн руды в день¹⁴, либо 30 тонн урана в год¹⁵. если оба сообщения верны, то среднее качество руды должно составлять 0.03 процента.

Сообщалось, что рудник в Багалчоре был почти полностью истощен в 1988 году¹⁶. Согласно сообщениям, рудник был закрыт в 2000 году и площадка стала использоваться для сброса радиоактивных отходов¹⁷. База данных мирового распределения месторождений урана МАГАТЭ сообщает, что первоначальное количество в месторождении Багалчоре не превышало 500 тонн, и сейчас месторождение истощено¹⁸.

Второй урановый рудник был открыт в Квабул Хел в 1992 году и разработка месторождений Нанганаи и Таунса (оба расположены рядом с Дера Гази Хан) началась в 1996 и 2002

годах соответственно; во всех месторождениях использовалась технология выщелачивания на месте¹⁹. Этот метод извлечения обычно используется для руды низкого качества. База данных мирового распределения месторождений урана МАГАТЭ (UDEPO) сообщает о первоначальных запасах урана на площадке Квабул Хел в 500 – 1000 тонн²⁰.

Таблица 1. Оценка годового внутреннего производства урана в Пакистане.

Год	Производство урана (т)	Суммарное производство урана с 1980 года (т)
1980	23	23
1981	23	46
1982	23	69
1983	23	92
1984	23	115
1985	23	138
1986	23	161
1987	23	184
1988	23	207
1989	23	230
1990	30	260
1991	30	290
1992	23	313
1993	23	336
1994	23	359
1995	23	382
1996	23	405
1997	23	428
1998	23	451
1999	23	474
2000	23	497
2001	16	513
2002	38	551
2003	40	591
2004	40	631
2005	40	671

Источник: OECD/IAEA, *Uranium Resources, Production, and Demand*, 1990, 1997, 1999, 2005, и 2007.

«Красные книги» ОЭСР/МАГАТЭ предоставляют оценки для производства урана в Пакистане, начиная с 1980 года; они сведены в таблицу 1²¹. Данные показывают приблизительно постоянное годовое производство примерно в 23 тонны урана до примерно 2000 года (когда был закрыт рудник в Бангалчоре) и несколько больше, примерно 40 тонн, начиная с 2003 года. Это увеличение производства предположительно обусловлено новым рудником в Квабул Хел.

Пакистан с большими затратами продолжает искать новые источники урана²². Однако, до 2009 года не сообщалось ни о новых находках, ни о новых рудниках.

Импорт урана

По-видимому, Пакистан импортировал некоторое количество урана. Он подписал с МАГАТЭ в 1977 году соглашение о гарантиях для импорта уранового концентрата из Нигера²³. Сообщалось о приобретении по крайней мере 50 – 110 тонн урана непосредственно у Нигера²⁴. Появлялись также сообщения о том, что Ливия могла закупать у Нигера уран, начиная с 1978 года, и затем секретно продавать или передавать некоторую его часть Пакистану²⁵. Но в качестве части деятельности МАГАТЭ по верификации в Ливии, начиная с 2003 года, сообщалось, что Ливия между 1978 и 1981 годом импортировала всего 2263 тонны

уранового «желтого кокса», содержащего 1587 тонн урана, и что все это было учтено в ливийских запасах²⁶. Из этого следует, что Пакистан мог импортировать только до 110 тонн урана и что этот импорт находится под гарантиями МАГАТЭ. Пакистан, по-видимому, мог также получить 15 тонн гексафторида урана и 50 кг ВОУ от Китая в 1982 году²⁷. Это не включено в представленные здесь учетные данные.

ПОТРЕБЛЕНИЕ УРАНА В РЕАКТОРАХ

У Пакистана есть два действующих энергетических реактора, KANUPP и Чашма, а третий реактор строится. Кроме того, имеется выделенный реактор в Хушабе, который производит плутоний для оружия, и еще два аналогичных строящихся реактора.

Реакторы KANUPP и Чашма находятся под гарантиями. Реактор Чашма мощностью 300 МВт-эл. загружается топливом с низкообогащенным ураном (НОУ), поставляемым из Китая, и в этом анализе он больше не рассматривается. Реактор KANUPP мощностью 125 МВт-эл. загружается топливом с природным ураном, был приобретен в Канаде и начал эксплуатироваться в 1970 году. Поначалу он загружался топливом из Канады. После индийского ядерного испытания в 1974 году и отказа Пакистана подписать Договор о нераспространении (ДНЯО) Канада прекратила поставки своего топлива. В ответ на это Пакистан создал свои собственные мощности по изготовлению топлива, и изготовил свою первую испытательную топливную связку в 1978 году²⁸.

Полное потребление урана на реакторе KANUPP с 1980 по 2009 годы может быть определено из его объявленного производства электроэнергии за этот период, и оно составляет 150 тонн (предполагая степень выгорания топлива в 7400 МВт-д/т)²⁹. Поскольку этот реактор находится под гарантиями, мы предполагаем, что урановое топливо будет братья в основном из находящегося под гарантиями импортного материала, а не из не находящегося под гарантиями местного материала. Предполагается, что этот последний вид запасов выделяется для военной программы.

Третий действующий пакистанский реактор для производства плутония в Хушабе не может использовать находящийся под гарантиями импортный уран и опирается исключительно на внутренний природный уран. Сообщается, что он является тяжеловодным реактором на природном уране с мощностью приблизительно 50 МВт-тепл.³⁰ Это представляется разумной оценкой мощности, учитывая, что изображения этого реактора показывают, что его купол очень похож по размеру на индийский реактор CIRUS мощностью 40 МВт-тепл. (см. рис. 1). Работы в Хушабе начались в 1986 – 87 годах и реактор вступил в строй в 1998 году³¹. Это требует, чтобы его топливо изготавливалось, начиная с 1997 года, если не раньше. Время облучения топлива должно быть коротким, для того, чтобы обеспечить низкую степень выгорания (обычно 1000 МВт-д/т), требуемую для производства плутония оружейного качества. Первая партия отработанного топлива была извлечена в 1999 году, а охлаждена и переработана в 2000 году. 16 марта 2000 года телеканал CBS News сообщил, что США получили образцы воздуха в Пакистане со следами критона-85, указывающими на активную переработку³².

В Хушабе строятся еще два реактора (см. рис. 2)³³. Два новых здания реактора кажутся идентичными друг другу, но отличающимися от здания реактора Хушаб I. По спутниковым изображениям кажется, что строительство реактора Хушаб II началось в 2001 – 2002 годах, в то время как работы на реакторе Хушаб III начались в 2005 или 2006 году³⁴. Изображения от сентября 2008 года показывают, что реактор Хушаб II может быть завершён в конце 2009 года³⁵.

Начальная оценка производительности этих реакторов заявляла мощность в по крайней мере 1000 МВт-тепл.³⁶ Однако, пакистанский официальный представитель указал, что мощность реактора Хушаб II будет намного меньше, чем 1000 МВт-тепл.³⁶, а американский официальный представитель указал, что «реактор будет больше, чем в 10 раз, менее мощным»³⁷. Последующие оценки показали, что реактор может быть намного ближе к реактору Хушаб I по размеру, с мощностью в 40 – 100 МВт-тепл.³⁸ Правительственные источники США пошли еще дальше, предположив, что «разведывательные данные показывают, что строящийся реактор, кажется, будет точно такого же размера, как небольшой реактор, который Пакистан использует сейчас для изготовления плутония для своей ядерной программы»³⁹.



Рисунок 1. Реактор Хушаб I – здание реактора в центре и восемь башенных охладителей справа (спутниковые изображения IKONOS с любезного разрешения компании GeoEye).

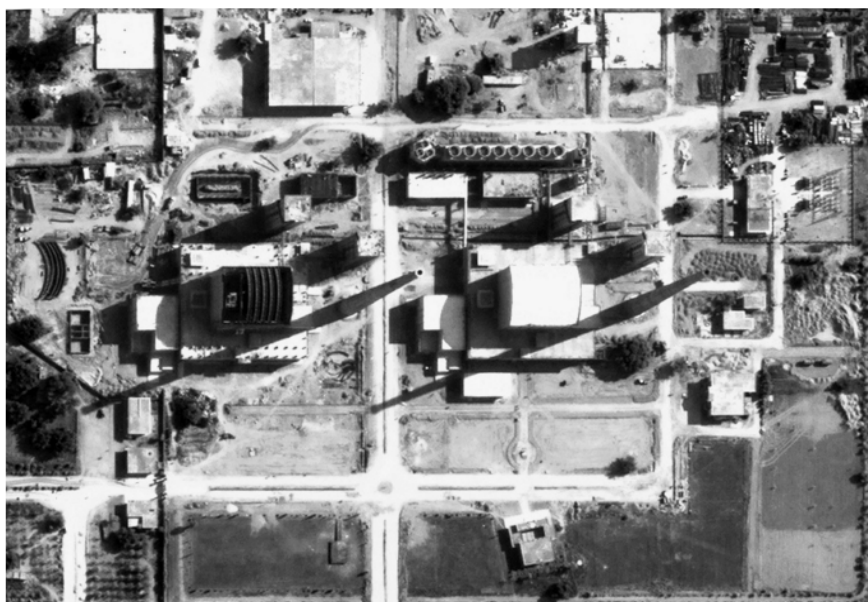


Рисунок 2. Строительство реактора Хушаб II (слева) и Хушаб III (справа) в январе 2009 года (изображения Digital Globe с любезного разрешения ISIS).

Башенные охладители предлагают еще одно указание на мощность этих реакторов. Анализ изображений реакторов Хушаб I и Хушаб II показывает, что у них обоих имеется идентичная группа из восьми механически совмещенных башенных охладителей диаметром приблизительно 5 м каждый. Кажется, что у реактора Хушаб II есть еще несколько башенных охладителей другой конструкции. Не ясно, являются ли они системы охлаждения реактора,

или служат какой-то другой цели. В любом случае, эти дополнительные башни добавят не более примерно 20 процентов к площади основного комплекта из восьми башенных охладителей.

Кроме того, оцениваемое текущее внутреннее производство урана в 40 тонн в год может поддержать только приблизительно 150 МВт·тепл. общей мощности, работающей с эффективностью в 70 % с низкой степенью выгорания, ассоциируемой с реакторами производства оружейного плутония⁴⁰. Если Пакистан будет эксплуатировать все три реактора в Хушабе, то представляется невероятным, что текущее производство урана позволит реакторам Хушаб II и Хушаб III имели мощность, сильно отличающиеся от 50 МВт·тепл. Поэтому, для целей этого анализа мощность каждого из трех реакторов в Хушабе принималось равной 50 МВт·тепл.



Рисунок 3. Первоначальный перерабатывающий завод (сверху справа) и возможный новый перерабатывающий завод (снизу справа) на площадке Нью Лабз, Равалпинди, сентябрь 2006 года (изображения Google Earth с любезного разрешения ISIS)..

Для обеспечения новых реакторов топливом Пакистан может расширить свои мощности по обработке урана и изготовления топлива. Похоже, что спутниковые изображения указывают на расширение комплекса химических заводов в Дера Гази Хан, который, как сообщается, производит как оксид урана для изготовления реакторного топлива и гексафторид урана для обогащения⁴¹. Здесь предполагается, что изготовление топлива для реакторов начнется с 2008 и 2009 года, и нормальная эксплуатация реакторов начнется в 2009 и 2010 году соответственно.

Пакистан также может расширить свои мощности переработки урана для обращения отработанного топлива из новых реакторов, которые вместе с реактором Хушаб I будут производить 39 тонн тяжелого металла в год. Полагают, что Пакистан перерабатывает отработанное топливо из реактора Хушаб I на своем предприятии в Нью Лабз около Равалпинди. Изображения 2009 года позволяют предположить, что Пакистан может построить второй перерабатывающий завод в Нью Лабз для обращения с дополнительным отработанным топливом (см. рис. 3)⁴². Имеются также указания, что между 2002 и 2006 годами Пакистан мог возобновить работу по большому перерабатывающему заводу в Чашма⁴³. Это предприятие должно было быть построено в середине 1970-х годов для переработки 100 тонн отработанного топлива в год, но сделка была расторгнута на ранней стадии строительства.

ПРОИЗВОДСТВО ПЛУТОНИЯ

В тяжеловодном реакторе при степени выгорания в 1000 МВт·тепл., типичной для производства плутония оружейного качества, отработанное топливо содержит приблизительно 0.9 кг плутония на тонну отработанного топлива⁴⁴. Реактор мощностью 50 МВт·тепл., работающий на 70 процентах мощности, при этой степени выгорания будет потреблять в качестве топлива приблизительно 13 тонн природного урана в год, и производить примерно 11,5 кг плутония оружейного качества в год.

График работ для промышленных реакторов Хушаб позволяет предположить, что Пакистан накапливает плутоний оружейного качества из реактора Хушаб I с 2000 года. К 2010 году Пакистан должен будет накопить приблизительно 115 кг, что эквивалентно чуть более 20 простых боеприпасов на делении, в предположении 5 кг на боеприпас. Плутоний из новых реакторов Хушаб должен стать доступным в 2011 и 2012 годах соответственно. Кумулятивное количество плутония, произведенного из отработанного топлива реакторов Хушаб, показано на рис. 4. Это позволяет предположить, что в 2020 году Пакистан может произвести приблизительно 450 кг плутония.

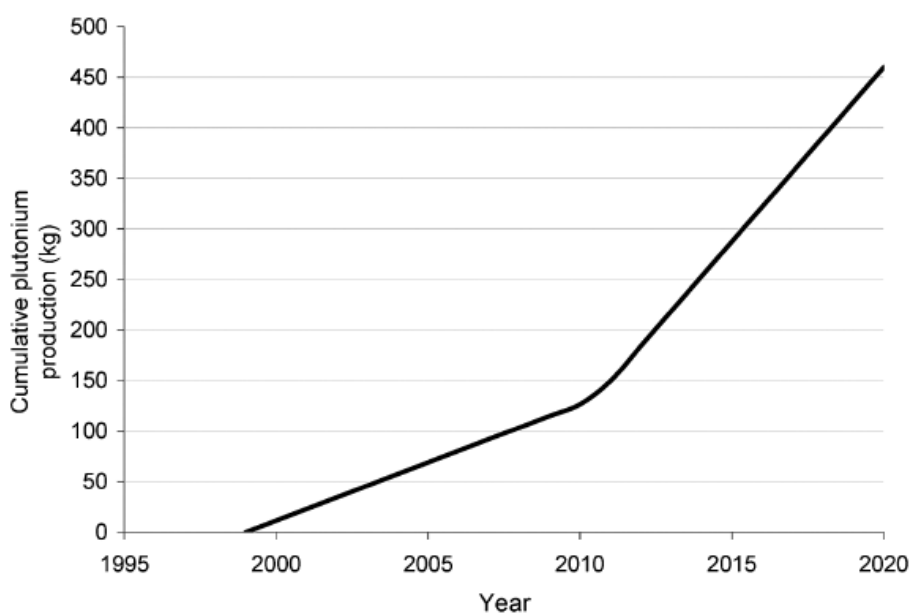


Рисунок 4. Кумулятивное производство плутония (в кг) из реакторов Хушаб до 2020 года.

ПЕРЕРАБОТАННЫЙ УРАН

Переработка отработанного топлива для извлечения плутония также создает поток урана, содержащего большое количество первоначального урана-235, который также может быть использован в качестве сырья для обогащения. Однако, такое использование затруднено из-за загрязнения другими изотопами урана и трансурановых элементов и химическими примесями.

Можно оценить в первом приближении величины изотопный состав урана (или вектор) в

отработанном топливе промышленного реактора с топливом из природного урана. Каждая тонна природного урана содержит 992.89 кг урана-238 и 7.11 кг урана-235. Годовое выделение энергии в промышленном реакторе мощностью 50 МВт·тепл., работающего со степенью выгорания 1000 МВт·д/т при 70 процентах мощности приходит от $306 \cdot 10^{23}$ делений, т.е. при делении примерно 12 кг урана-235⁴⁵. В целом реактор потребляет 12.8 тонн топлива в год и 0.937 кг урана-235 потребляется на тонну топлива. Таким образом, годовая разгрузка отработанного топлива реактора будет содержать приблизительно 12.8 тонн урана с 0.62 процента урана-235.

Переработанный уран также содержит изотопы урана-232, урана-233, урана-236 и урана-237, которые не присутствуют в природном уране. Содержание этих изотопов в переработанном уране зависит от типа топлива, первоначального обогащения ураном-235, степени выгорания топлива, и времени охлаждения отработанного топлива до переработки. Поскольку обогащение служит для увеличения относительной распространенности более легких изотопов, радиоактивность обогащенного переработанного урана больше, чем у обогащенного природного урана. Изотоп урана-232 (период полураспада 69 лет) является проблемой, поскольку его цепочка распада включает дочерние продукты, которые являются сильными излучателями бета- и гамма-лучей (свинец-212, висмут-212, и полоний-208). Другие изотопы менее существенны в аспекте радиологической опасности. В табл. 2 перечислены распространенности для изотопов урана в топливе тяжеловодного реактора с малой степенью выгорания⁴⁶.

В переработанном уране имеются также трансурановые изотопы и химические примеси, которые следуют за ураном при фторировании и в процессе обогащения, распространенность которых зависит от эффективности операций переработки⁴⁷. В результате производство и использование обогащенного переработанного урана обычно требует выделенных перерабатывающих установок с дополнительной защитой операторов, и оно может потребовать модифицированных эксплуатационных процедур на обогатительном предприятии, включающих сокращение времени между преобразованием в UF_6 и обогащением, очистку UF_6 , специальные фильтры и особое обращение с баллонами для сырья и продукции⁴⁸.

Таблица 2. Распространенности изотопов урана в топливе тяжеловодного реактора со степенью выгорания 1000 МВт·д/т.

Изотоп	Распространенность (в весовых процентах)
U-232	1.013×10^{-10}
U-233	2.550×10^{-9}
U-234	0.005
U-235	0.616
U-236	0.015
U-238	99.37

Переработанный уран обогащался в различных странах, несмотря на то, что это более трудно и дорого⁴⁹. Например, Великобритания обогащала переработанный уран (содержащий 0.4 процента урана-235) из своих реакторов «Магнокс» с топливом из природного урана на газодиффузионном заводе в Кейпенхорсте (до 0.7 процента) и затем далее обогащала его (до 2.6 – 3.4 процента) на центрифужных заводах «Уренко» в Кейпенхорсте для топлива своих модернизированных энергетических реакторов с газовым охлаждением⁵⁰. Как Соединенные Штаты, так и Россия обогащали переработанный уран, извлеченный из реакторов для производства плутония до 90-процентного урана-235, т.е. до уровня, типичного для оружия⁵¹. Это может стать вариантом для Пакистана, поскольку он сталкивается с нехваткой природного урана для своей программы обогащения. 15 тонн гексафторида урана, которые Пакистан предположительно получил от Китая в 1982 году, могли содержать переработанный уран.

ОБОГАЩЕНИЕ УРАНА

История пакистанской программы обогащения урана на центрифугах отмечена значительной секретностью, спекуляциями и некоторой драматичностью. Для того, чтобы провес-

ти согласованную оценку производства ВОУ и потребления урана, необходимо отобрать из различных сообщений возможный сценарий количества центрифуг и их производительности в различные периоды. Эта работа в основном опиралась на источники, цитированные Олбрайтом, Беркхаутом и Уолкером⁵².

СОБИРАНИЕ МОЗАИКИ ИСТОРИИ ПАКИСТАНСКИХ ЦЕНТРИФУГ

Сначала Пакистан исследовал несколько методов обогащения урана, включая лазер, центрифуги и диффузию⁵³. Решение о продолжении с обогатительным заводом с газовыми центрифугами было принято в ноябре 1974 года⁵⁴. Пакистан также заключил контракт с немецкой компанией на строительство завода для производства гексафторида урана с сообщенной мощностью примерно в 200 тонн в год, который предположительно начал работу в 1980 году⁵⁵.

Программа центрифуг началась во вновь построенной Лаборатории энергетических исследований в Кахуте с двумя типами конструкций. Пакистан начал работы с центрифугами на базе голландской центрифуги CNOR-SNOR (в пакистанском контексте иногда называемой как P-1) и добились разделения изотопов урана на своем прототипе центрифуги в июне 1978 года, а первый каскад из 54 машин был установлен в начале 1979 года⁵⁶. Сообщения, цитирующие А.К. Хана, указывают, что впервые Пакистан смог обогатить природный уран до нескольких процентов урана-235 в 1980 году⁵⁷, а до оружейного качества в 1982 году⁵⁸. Однако, это предположительно относилось к образцам малого размера. В материале брифинга Госдепартамента США 1983 года указывалось, что Пакистан «еще не производил значительного количества обогащенного урана»⁵⁹.



Рисунок 5. Северная (первоначальная) производственная площадка обогатительного завода в Кахуте (изображения со спутника IKONOS, любезно предоставленные компанией GeoEye).

Крупномасштабное обогащение с использованием каскадов центрифуг Р-1, по-видимому, оказалось для Пакистана проблематичным. Их опыт с машинами G-2 немецкого проекта (в пакистанском контексте называемыми Р-2), по-видимому, оказался более успешным, и в середине 1980-х годов осуществлялось их массовое производство⁶⁰. Сообщение 1986 года заявляет, что в Кахуте два типа центрифуг располагались в «двух больших зданиях, стоящих под небольшим углом друг к другу ... содержащих около 7000 центрифуг»⁶¹ (смотрите рис. 5). Однако, полагали, что в 1986 году в эксплуатации находилась тысяча машин, или около этого⁶². На некотором этапе, вероятно, в середине 1980-х годов, Пакистан ограничил свое использование машин Р-1, и перешел к использованию Р-2, и позднее, возможно, более совершенных машин⁶³.

А.К. Хан впоследствии заявлял, что к 1984 году Пакистан произвел достаточно урана для ядерного испытания, которое они надеялись провести в 1986 году⁶⁴. Внутренний меморандум США Генри Киссинджеру в 1986 году заявлял, что номинальная производительность Кахуты достаточна для того, чтобы производить «материал оружейного качества для изготовления нескольких ядерных устройств в год»⁶⁵. В 1988 году сообщалось, что Пакистан имеет достаточно урана оружейного качества для четырех или шести боеприпасов (т.е. 100 – 150 кг ВОУ)⁶⁶. Официальный представитель США заявил, что Пакистан в конце 1991 года имел достаточно ВОУ по крайней мере для шести боеприпасов⁶⁷.

Информации о возможной конструкции каскада, используемого Пакистаном, немного. Одним источником является обвинительный акт, представленный в южноафриканском суде, относящийся к проекту, обнаруженному здесь, для создания обогатительного завода для экспорта в Ливию, с использованием пакистанского проекта, предоставленного сетью А.К. Хана⁶⁸. Планы проекта каскада описывались как «продукт оригинальных немецких чертежей и описаний, адаптированных к пакистанским результатам испытаний, опыту, и справочным расчетам», и показывали четыре блока каскадов, состоящих всего из 5832 центрифуг. Первый блок содержит два параллельных каскада по 1968 машин в каждом и обогащает природный уран до 3.5 процента урана-235. Второй блок включает 1312 машин и обогащает этот 3.5-процентный материал до 20 процентов урана-235. Третий блок, с 456 машинами, далее обогащает этот материал до 60-процентов урана-235. Последний блок, из 128 машин, производит материал, обогащенный до 90 процентов. Для каждого из этих пяти каскадов имеются отдельные стадии подачи и отвода. Это позволяет, в принципе, осуществлять каждую из этих стадий обогащения на отдельных установках.

Южноафриканское сообщение позволяет предположить, что Пакистан может иметь конструкцию каскадов примерно из 6000 машин. Отметим, однако, успешно эксплуатировать такой каскад с половиной от этого числа центрифуг, т.е. 3000 машин, при условии, что количество машин на каждой стадии будет также уменьшено до половины, при сохранении тех же самых отношений от стадии к стадии. Это согласуется с сообщениями о том, что планы для Кахуты в конце 1980-х годов предусматривали 2000 – 3000 центрифуг, и с заявлением официального представителя США о том, что в 1991 году в Кахуте находилось примерно 3000 работающих машин⁶⁹. Если эти 3000 машин были центрифугами Р-1 или Р-2, с производительностью в 3 или 5 кг-ЕРР/год (или ЕРР) каждая, то это дало бы общую производительность в 9000 или 15000 ЕРР для полного каскада, в зависимости от машины.

Принимая во внимание эти сообщения, правдоподобным сценарием для первой фазы программы обогащения Пакистана (примерно до 1990 года) мог бы быть следующий:

1. У Пакистана не было существенных мощностей обогащения до примерно 1982 года.
2. Он достиг существенной производительности обогащения для изготовления 20 кг/год ВОУ в течение 1983 – 1985 годов (это требует разделительной мощности примерно в 3000 ЕРР, производимой приблизительно 1000 центрифуг в 3 ЕРР каждая).
3. Он увеличивал производительность линейно до 9000 – 15000 ЕРР в 1990 году, используя комбинацию машин Р-1 и более мощных и менее проблематичных машин Р-2.

Новый период в обогащении урана Пакистаном начался в 1990-1991 годах. США безуспешно пытались остановить программу обогащения Пакистана, начиная с их принятия дополнения Саймингтона в 1972 году и дополнения Пресслера в 1985 году, запрещающих помощь Пакистану из-за его деятельности по обогащению⁷⁰. Однако, эти ограничения были

отклонены последующими администрациями по геополитическим соображениям, и поэтому обогащение продолжалось. В это время Пакистан обязался обогащать уран только до 5 процентов, но, согласно официальным представителям США, было похоже, что обогащение значительно превышало этот уровень⁷¹. Был, однако, короткий перерыв в производстве ВОУ, начавшийся в середине 1989 года в ожидании визита премьер-министра Беназир Бхутто в США, но производство было возобновлено в 1990 году⁷². США в конце концов в 1990 году наложили санкции, и в попытке добиться отмены этих санкций Пакистан принял бессрочный мораторий на производство ВОУ в 1991 году⁷³. Начальник штаба армии Пакистана в то время, Мирза Аслам Бег, по-видимому, подтвердил такой мораторий и объяснил, что Пакистан начал производить только НОУ, обогащенный, возможно, до 5% урана-235⁷⁴.

Официальные представители США заявляли о разведывательных данных, подтверждающих, что Пакистан останавливал производство ВОУ по крайней мере до ядерных испытаний 1998 года, хотя даже после испытаний А.К. Хан отрицал это⁷⁵. Отметим, однако, что кумулятивное производство ВОУ в обеих случаях в конце концов станет одинаковым, поскольку обогатительный завод в течение этого периода работал на полной мощности. Так происходит потому, что общее количество ВОУ, произведенного с данным обогащением (и отходами) зависит только от использованных мощностей ЕРР, и не зависит от стадий, в которых производилось обогащение (смотрите ниже формулу для мощности ЕРР). В этом исследовании предполагалось, что производство ВОУ останавливалось.

Если, как заявлял начальник штаба пакистанской армии, производство ВОУ приостанавливалось, испытания 1998 года, предположительно, устранили необходимость в исполнении такого ограничения. Здесь предполагается, что обогащение до 90 процентов возобновилось в середине 1998 года, вскоре после испытаний. Производство ВОУ могло быть возобновлено быстро посредством использования в качестве сырья НОУ, которое было накоплено за годы, прошедшие после 1991 года. После того, как эти запасы были исчерпаны, Пакистан мог возвратиться к использованию сырья из природного урана.



Рисунок 6. Южная производственная площадка обогатительного завода в Кахуте (изображения со спутника IKONOS, любезно предоставленные компанией GeoEye).

Тем временем, строительство дополнительных обогатительных мощностей, по-видимому, продолжалось. Спутниковые изображения позволяют предположить, что на некоторой стадии к предприятию в Кахуте была добавлена вторая производственная площадка (см. рис. 6)⁷⁶. Пакистан разработал собственные возможности для производства мартенситно-старееющей стали и некоторых других компонентов для центрифуг. Он также импортировал компоненты, включая покупку у Китая 5000 кольцевых магнитов, которые используются как часть верхних подшипников центрифуг, что, возможно, помогло организовать изготовле-

ние нескольких тысяч дополнительных машин⁷⁷.

Появились также сообщения, что в 1980-х годах Пакистан начал разработку более мощных центрифуг Р-3 и Р-4, аналогичных соответственно машинам «Уренко» 4-М (12 ЕРР) и ТС-10 (20 ЕРР)⁷⁸. Ясной информации о том, были ли, когда и как многие из этих более совершенных центрифуг были введены в эксплуатацию Пакистаном, не имеется. Здесь предполагается, что любое увеличение мощностей, будь то за счет дополнительных машин Р-2, Р-3, или Р-4, было осуществлено в 1999 году, вскоре после ядерных испытаний.

Характеристики различных поколений пакистанских центрифуг, которые получены из различных опубликованных сообщений, сведены в табл. 3.

В этой статье предполагалось, что обогатительные мощности Пакистана возрастали от 3000 ЕРР в 1983 году до 15000 ЕРР в 1990 году. Для периода после 1990 года в этом исследовании рассматриваются четыре сценария обогащения, построенных из модулей, состоящих из 3000 центрифуг, определенных из эскизов пакистанских каскадов, предоставленных южноафриканскому изготовителю.

Эти сценарии таковы:

1. Продолжающиеся мощности обогащения в 15 000 ЕРР, как, по-видимому, предполагают некоторые аналитики⁷⁹.
2. Увеличение мощностей обогащения от 15 000 до 30 000 ЕРР, начиная с 1999 года, возможно, из 6 000 машин Р-2.
3. Увеличение мощностей обогащения от 15 000 до 45 000 ЕРР, начиная с 1999 года, возможно, из каскадов по 3 000 машин Р-2 и 3 000 машин Р-3.
4. Увеличение мощностей обогащения от 15 000 до 75 000 ЕРР, начиная с 1999 года, возможно, из каскадов по 3 000 машин Р-2 и 3 000 машин Р-4.

В этих сценариях полные мощности обогащения могут быть расположены не только в Кахуте. Они могут быть распределены на дополнительных площадках. Появлялись заявления о том, что у Пакистана могут быть обогатительные предприятия в Сихале, Голре и Гадвале⁸⁰. Гадвал был недавно указан как предприятие, на котором обогащенный уран обогащается далее до оружейного качества⁸¹. К целям приведенного ниже анализа, однако, имеет отношение только полная мощность в ЕРР.

Таблица 3. Характеристики пакистанских центрифуг.

Центрифуга	Материал ротора	Количество сегментов	Общая длина (м)	Разделительная мощность кг ЕРР/год	Скорость на периферии м/с
Р-1 ¹	Алюминий	4	2	1 – 3	350
Р-2 ²	МСС	2	1	около 5	450
Р-3 ³	МСС	4	2	около 12	485
Р-4 ⁴	МСС	6	около 3	около 20	508

¹ Mark Hibbs, "Classified Dutch Report Suggested Khan Saw Key 4-M Centrifuge Data," *Nuclear Fuels*, 17 January 2005.

² Mark Hibbs, "Report Suggests Pakistan Bought Components For Two Steel Centrifuges," *Nuclear Fuels*, 4 July 2005.

³ Mark Hibbs, "Pakistan Developed More Powerful Centrifuges," *Nuclear Fuels*, 29 January 2007.

⁴ Mark Hibbs, "P-4 Centrifuge Raised Intelligence Concerns About Post-1975 Data Theft," *Nuclear Week*, 15 February 2007.

МСС – мартенситно-стареющая сталь.

Таблица 4. ЕРР на килограмм продукции для различных концентраций сырья, продукции и отходов.

Концентрация U-235 в сырье	Концентрация U-235 в продукции	Концентрация U-235 в отходах	Отношение сырья к продукции	Работа разделения на кг продукции
0.71%	90%	0.3%	218	193
0.71%	5%	0.3%	11.4	7.2
0.71%	90%	0.5%	424	154
0.71%	5%	0.5%	21	5.3
0.71%	90%	0.1%	147	293
5%	90%	0.3%	19	56
5%	90%	0.5%	20	48
5%	90%	0.1%	18.4	73
0.62%	90%	0.3%	280	208
0.62%	90%	0.1%	173	320
0.3%	90%	0.1%	450	500

Максимальная рассматриваемая здесь мощность равна 75 000 ЕРР. Предлагаемый обогатительный завод в Чак Джумра около Файзалабада в провинции Пенджаб сюда не включается, поскольку он будет находиться под гарантиями⁸². Эти мощности предназначались для снабжения топливом амбициозного расширения программы атомной энергетики Пакистана, с целью достижения 8 800 МВт к 2030 году⁸³. Вряд ли эти планы будут реализованы, поскольку Пакистану в настоящее время запрещено покупать реакторы по правилам группы ядерных поставщиков⁸⁴. Если продажи реакторов будут разрешены, то вероятно, что поставщики будут поставлять под гарантиями как реакторы, так и топливо – как это производится в случае двух энергетических реакторов в Чашма, поставленных Китаем Пакистану.

В последующем анализе рассматривается жизнеспособность четырех сценариев обогащения с использованием обсуждавшихся выше ограничений по поставке урана.

ПОТРЕБЛЕНИЕ УРАНА И ПРОИЗВОДСТВО ВОУ

В этом разделе проводятся оценки потребления урана и производства ВОУ в намеченных выше четырех сценариях.

Основные уравнения, связывающие урановое сырье (F), продукцию (P), отходы (T), и их соответствующие концентрации (n) с мощностью обогащения ЕРР (SWU), хорошо известны⁸⁵. Они таковы:

$$\frac{n_p - n_t}{n_f - n_t} = \frac{F}{P} = \frac{T}{P} + 1$$

$$SWU = P \cdot V(n_p) + T \cdot V(n_t) - F \cdot V(n_f)$$

где

$$V(x) = (2x - 1) \ln \left(\frac{x}{1-x} \right)$$

это «функция ценности».

Следовательно, P, количество произведенного ВОУ, и соответствующее количество сырья F, могут быть определены из мощности обогащения ЕРР (SWU) для заданного набора концентраций.

Для удобства в табл. 4 приведены значения ЕРР на килограмм продукции для некоторых полезных значений концентраций сырья, продукции и отходов.

Используя эти уравнения, можно рассчитать, что обогатительные мощности в 15 000, 30 000, 45 000 и 75 000 ЕРР, производящие 90-процентный ВОУ из природного урана с 0.3-процентными отходами, потребуют ежегодного количества сырья соответственно в 17, 34,

51 и 85 тонн. Кроме того, каждый из реакторов в Хушабе будет потреблять примерно 13 тонн в год. В то же время, как отмечалось ранее, предполагается, что внутреннее производство природного урана в Пакистане будет постоянным на уровне 40 тонн в течение ряда лет. Следовательно, в конце концов годовая добыча природного урана не сможет удовлетворит ежегодные потребности. После этого Пакистан должен будет использовать не находящиеся под гарантиями накопленные запасы ранних лет, когда ежегодные потребности были меньше, но через некоторое время они также закончатся. Очевидно, что это произойдет тем быстрее, чем больше будет мощность обогащения завода с центрифугами.

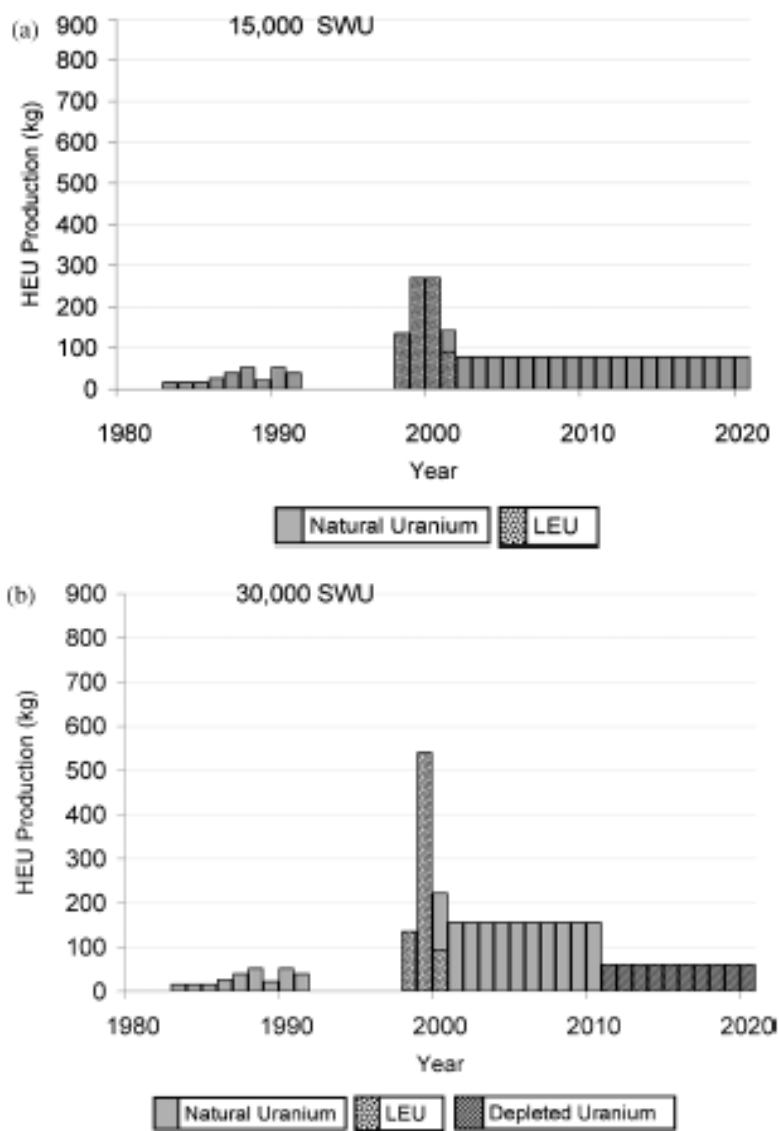


Рисунок 7 (a-d). Производство ВОУ (в кг) для мощностей обогащения от 15 000 до 75 000 ЕРР. Области с различной заливкой соответствуют различному сырьевому материалу. Светло-серая заливка соответствует природному урану, области с точечной заливкой соответствуют НОУ, заштрихованные области соответствуют отходам обедненного урана, а области с двойной штриховкой на рисунках (c) и (d) соответствуют переработанному урану.

Хотя поставки природного урана будут исчерпываться, имеются еще два других источника сырьевого материала для центрифуг, а именно, отходы обедненного урана от предыдущей деятельности по обогащению и уран, извлеченный из переработанного отработанного топлива. Обогащение каждой тонны обедненного урана (с 0.3 процентами урана-235) даст 2.2 кг 90-процентного ВОУ, если он будет еще более обеднен до содержания в отходах 0.1 процента урана-235⁸⁶. Будет также возможно использовать извлеченный из отработанного топлива реакторов в Хушабе уран, который может содержать приблизительно 0.62 процента

урана-235, как отмечалось выше. Оба этих варианта включены в последующие вычисления.

Во всех случаях предполагается, что отходы обедненного урана используются в качестве сырья для обогащения после того, как запасы природного урана будут истощены. Отметим, однако, что Пакистан, как сообщают, использует обедненный уран для производства бронебойных снарядов⁸⁷. Предполагается, что такое использование невелико, и, в любом случае, включает отходы обедненного урана, образованные во втором процессе обогащения. Когда запасы отходов обедненного урана истощатся, предполагается, что на обогатительное предприятие будет поставляться переработанный уран. Так будет делаться потому, что последний содержит следы других изотопов, которые будут загрязнять центрифуги.

На рис. 7a-d показано годовое производство ВОУ с 1980 по 2020 год для четырех рассматриваемых здесь сценариев обогащения. Эти рисунки содержат несколько интересных особенностей. Во-первых, отметим, что следующие пять особенностей присутствуют во всех четырех сценариях:

1. Производство ВОУ до 1998 года для всех случаев одинаково, поскольку мощности обогащения до 1998 года было одним и тем же. Постепенное увеличение в течение этого периода соответствует постоянной мощности в 3 000 ЕРР с 1983 по 1985 год с последующим линейным увеличением и достижением 15 000 ЕРР в 1990 году.
2. Небольшой провал в производстве ВОУ в 1989 – 1990 годах соответствует кратковременному мораторию, связанному с визитом Беназир Бхутто в Соединенные Штаты.
3. После 1991 года производство ВОУ было остановлено до 1998 года, когда действовал мораторий на производство ВОУ. В течение этого времени программа обогащения производила НОУ (предположительно с 5 процентами урана-235). Было оценено, что за этот период накопилось около 15 тонн НОУ.
4. Резкое увеличение производства ВОУ с 1998 по примерно 2000 году связано с использованием накопившегося НОУ в качестве сырьевого материала. Время, требующееся для обогащения НОУ до ВОУ, уменьшается с увеличением мощности в ЕРР. Это отражается в увеличении высоты столбца от рис. 7(a) до рис. 7(d). Общее количество ВОУ, произведенного этим способом, во всех четырех случаях равно примерно 750 кг.
5. Весь НОУ был преобразован в ВОУ к 2001 году. После этого использование природного урана в качестве сырья возобновляется до тех пор, пока он не истощится.

Отметим, что в случае мощности в 15 000 ЕРР, рис. 7(a), запасы природного урана сохранятся и после 2020 года. После примерно 2001 года, когда весь запас НОУ был обогащен, центрифуги возвратились к использованию природного урана на постоянном уровне в 17 тонн в год с производством примерно 80 кг ВОУ за год. Это можно вывести из доступного запаса в 200 тонн природного урана, которых хватит примерно до 2024 года, в то время как 40 тонн ежегодного производства пойдут на топливо для реакторов в Хушабе. Здесь не возникнет необходимости ни в обедненном уране, ни в переработанном уране в качестве сырья.

В случае мощности в 30 000 ЕРР, рис. 7(b), запасы природного урана закончатся в 2011 году. Продолжающееся ежегодное производство в 40 тонн будет использоваться тремя реакторами в Хушабе. После этого в качестве сырья для центрифуг будет использоваться обедненный уран, содержание урана-235 в котором будет уменьшаться до 0.1 процента. В течение этого периода ВОУ будет производиться со скоростью 60 кг в год с потреблением 27 тонн обедненного урана. Это будет продолжаться после 2020 года, так что переработанный уран не понадобится.

Для 45 000 ЕРР, рис. 7(c), запасы природного урана заканчиваются в 2005 году при производстве 233 кг ВОУ в год⁸⁸. Затем начинается использование в качестве сырья обедненного урана, содержание урана-235 в котором будет уменьшаться до 0.1 процента. Это потребует 41 тонны сырья из обедненного урана в год при производстве 90 кг ВОУ в год. Это показано на рисунке более темным цветом. К 2019 году закончатся и запасы обедненного урана⁸⁹. С этого момента в качестве сырья начнет использоваться переработанный уран (как показано на рисунке двойной штриховкой) при производстве ВОУ в 141 кг в год с содержанием урана-235 в отходах в 0.1 процента.

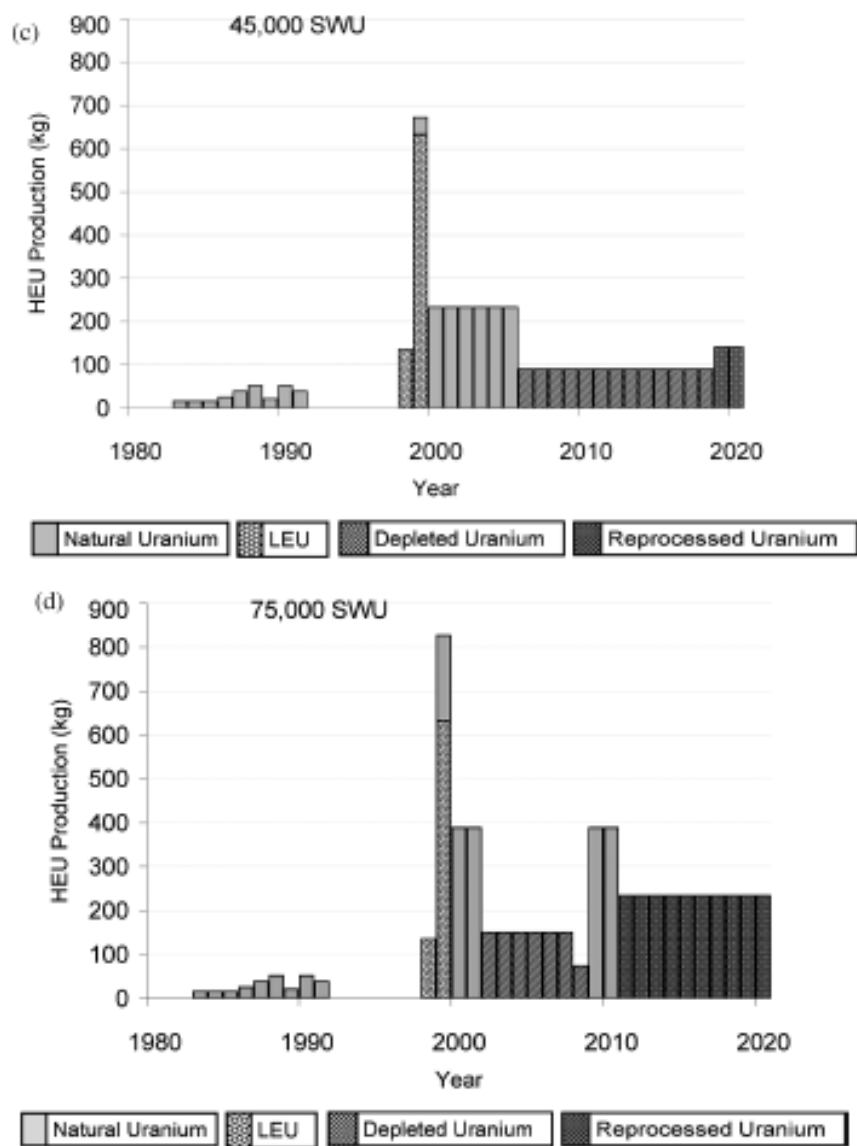


Рисунок 7 (продолжение).

Для варианта в 75 000 ЕРР, рис. 7(d), запасы природного урана заканчиваются примерно в 2002 году⁹⁰. После этого в качестве сырья используется накопленный обедненный уран, которого хватает до 2008 года при производстве ВОУ в 150 кг в год. Параллельно между 2002 и 2008 годами накапливается 184 тонны природного урана. Они могут быть использованы в течение двух лет для производства 389 кг ВОУ в год в течение 2009 и 2010 годов. Это показано на рис. 7(d). После 2010 года почти весь природный уран потребляется тремя реакторами в Хушабе, и накопленные запасы отходов обогащения также закончатся. Поэтому обогатительный завод будет потреблять в качестве сырья переработанный уран. Мощности в 75 000 ЕРР могут принимать 41 тонну сырья из переработанного урана для производства 234 кг ВОУ в год (с 0.1 процента урана-235 в отходах). Поскольку все реакторы в Хушабе, вместе взятые, производят 39 тонн переработанного урана в год, дополнительные две тонны придут из накопленных запасов переработанного урана, Эти запасы не закончатся в 2020 году.

На рис. 8 показаны прогнозы кумулятивных запасов ВОУ в Пакистане для четырех сценариев обогащения.

Эта оценка предполагает следующую последовательность видов сырья для центрифуг: сырье из природного урана, за которым сначала следует использование НОУ, накопленного между 1992 и 1998 годами, затем отходы обедненного урана до тех пор, пока они не закончатся, и, наконец, использование переработанного урана. Эта последовательность согласованно применяется во всех четырех случаях для простоты и возможности сравнения. Другие

предположения приведут к другим сценариям. Например, после того, как завершится обогащение запасов НОУ до ВОУ, и запасы природного урана для сырья станут меньше ежегодных требований для обогащения, оставшиеся запасы урана могут быть смешаны с накопившимся обедненным ураном (0.3 процента урана-235) для производства дополнительного сырьевого материала, и эта отходы от обогащения этой смеси будут содержать 0.1 процента урана-235. Отношение смешивания в сырьевом материале будет определяться доступным количеством природного урана и мощностями обогащения.

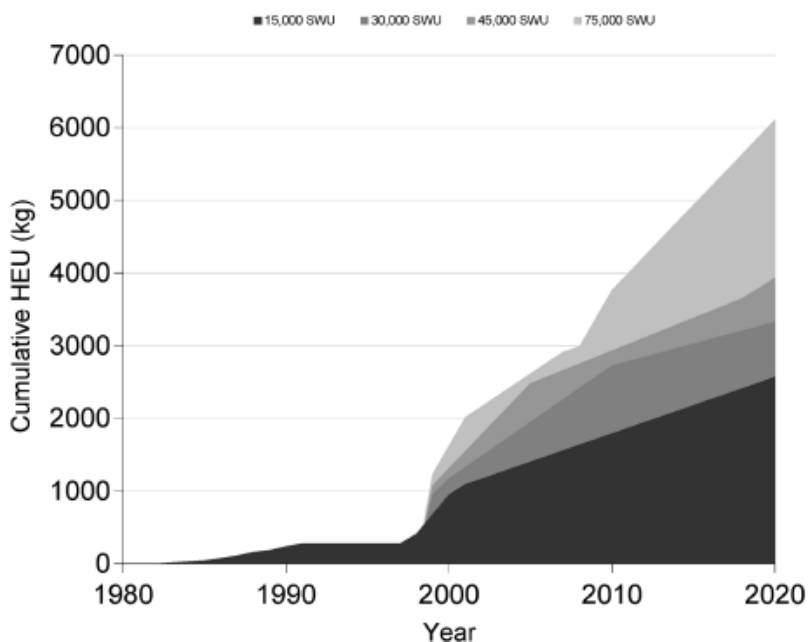


Рисунок 8. Ежегодный прирост запасов ВОУ для четырех вариантов мощностей обогащения до 2020 года. Более темный оттенок соответствует меньшей мощности обогащения.

Пакистан может пропустить использование обедненного урана и уже начать использовать переработанный уран из реактора в Хушабе в качестве сырья для своей программы обогащения. В 2004 году во время инспекции компонентов центрифуги в Иране, которые, как полагали, были импортированы из Пакистана, МАГАТЭ сообщило, что они обнаружили «частицы НОУ и ВОУ», которые были приписаны «загрязнению, происходящему от импортированных компонентов центрифуги». МАГАТЭ обнаружило, что многие из образцов имеют «повышенное содержание урана-236, что предполагает использование переработанного урана в качестве сырьевого материала»⁰¹. Следы ВОУ были обнаружены также на компонентах центрифуг, которые Пакистан продал Ливии, и МАГАТЭ сообщало «Образцы окружающей среды показывают загрязнение низко- и высокообогащенным ураном на полу участка испытаний центрифуги L-1 ... на центрифуге и сломанных деталях ротора, на системах подачи и отбора, и на масс-спектрометре, использованном в испытаниях. ... Большая часть содержания U-236 аналогична тому, что было обнаружено в Государстве, которое поставило компоненты центрифуги L-1»⁰². По-видимому, это указывает на то, что Пакистан поставил как Ливии, так и Ирану компоненты, ранее использованные для обогащения переработанного урана. Этот переработанный уран мог, однако, попасть в 15 тонн гексафторида урана, которые Пакистан, возможно, получил от Китая в 1982 году, и был обогащен сразу же после этого, поскольку некоторые поставки компонентов центрифуг в Иран и Ливию произошли до того, как отработанное топливо из Хушаба стало доступным для переработки в 1999 – 2000 годах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный здесь анализ указывает на согласованную картину обогащения пакистанскую программу обогащения урана и производства плутония, основанную на оценке баланса урана. Она предполагает, что Пакистан опирается исключительно на внутренний уран для своих программ обогащения урана и производства плутония, и использует ежегодные оценки внутреннего производства урана в Пакистане из «Красной книги» ОЭСР/МАГАТЭ, которые в течение почти тридцати лет находятся в пределах 20 – 40 тонн в год. Пакистан в течение многих лет не может импортировать уран из-за международного контроля поставок. Материал, который был импортирован ранее, и находится под гарантиями МАГАТЭ, не может быть использован для оружия. Эта ограниченная доступность природного урана накладывает ограничения на производство расщепляющихся материалов для оружия.

На основании доступных общественности источников представляется, что в производстве расщепляющихся материалов в Пакистане было два различных этапа. Первый этап продолжался с начала 1980-х годов до примерно 1998 года. В течение этого периода программа обогащения Пакистана выросла со сравнительно небольшого количества в 1000 центрифуг с мощностью в 3000 ЕРР до приблизительно 9000 – 15000 ЕРР. Плутоний оружейного качества не производился. В течение этого периода у Пакистана было достаточно урана для питания своих центрифуг. Фактически, на начальных стадиях был избыток урана, что привело к появлению небольшого резерва урана примерно в 200 тонн в 1998 году.

На следующем этапе в десятилетие после ядерных испытаний 1998 года, приблизительно в 1999 – 2009 годах, потребности в уране могли увеличиться по двум причинам. Во-первых, Пакистан начал производить плутоний оружейного качества на своем реакторе в Хушабе в 1999 году. Оценено, что при разумном коэффициенте использования (приблизительно 70 процентов) реактору в Хушабе требуется примерно 13 тонн топлива из природного урана в год. Во-вторых, хотя некоторые источники утверждают, что в течение этого периода мощности обогащения оставались примерно одними и теми же, другие источники указывают на то, что Пакистан мог ввести в строй дополнительные центрифуги Р-2, и, возможно, перешел к более мощным машинам Р-3 и Р-4.

Если в течение этого второго этапа мощности обогащения оставались постоянным на уровне 15 000 ЕРР, то требования для обогащения (17 тонн в год) и реактора в Хушабе (13 тонн в год) могли удовлетворяться ежегодным производством в 40 тонн в год. Для мощностей обогащения в 30 000 ЕРР будут использоваться резервы избыточного урана с прошлых лет. Если мощности будут намного больше, например, 45 000 или 75 000 ЕРР, эти резервы должны были закончиться примерно в 2006 и в 2002 году, соответственно.

После того, как запасы природного урана будут исчерпаны, а ежегодное производство станет недостаточным, как это происходит при мощностях в 45 000 и 75 000 ЕРР, Пакистан должен будет либо добывать больше 40 тонн урана в год, или искать альтернативное сырье. Одним из источников сырья могут быть отходы обедненного урана от прежних работ по обогащению. Второй возможностью может быть применение переработанного урана, извлеченного из отработанного топлива промышленных реакторов в Хушабе. Поскольку эти реакторы должны работать при малых степенях выгорания для производства плутония оружейного качества, их отработанное топливо все еще будет содержать приблизительно 0.6 процента урана-235, не намного меньше, чем 0.7 процента в природном уране.

Поскольку переработанный уран содержит другие более радиоактивные изотопы, делающие его более сложным в обращении, будет предпочтительнее использовать его после того, как запасы обедненного урана закончатся. Представленный здесь анализ показывает, что поставки отходов обогащения урана достаточны для питания центрифуг до настоящего времени для всех мощностей обогащения вплоть до 75 000 ЕРР.

Обращаясь к будущему, от настоящего времени до 2020 года, мы применяем те же самые общие принципы, но с дополнительным различием, что ожидается вступление в строй еще двух реакторов для производства плутония в Хушабе. В предположении, что они будут иметь ту же самую мощность, что и Хушаб I (50 МВт-тепл.) и будут работать с коэффициентом использования 70 процентов, три реактора будут поглощать почти все оцениваемое текущее производство урана в 40 тонн. Поэтому для поддержания программы обогащения Пакистану придется начать использовать свои запасы урана с прошлых лет, если таковые

имеются, добывать дополнительный уран, или использовать в качестве сырья накопившийся обедненный уран или переработанный уран.

Периоды, в течение которых будут использоваться природный уран, обедненный уран и переработанный уран, конечно, зависят от мощностей обогащения. Различные варианты представлены на рис. 7 до 2020 года при добыче природного урана в 40 тонн в год. Как показано здесь, запасы природного урана будут достаточны для снабжения мощностей в 15 000 ЕРР. Для варианта с 30 000 ЕРР дополнение природного урана накопившимся обедненным ураном может предоставить дополнительное сырье. Использование переработанного урана станет необходимым до 2020 года для больших мощностей обогащения. Мощности до 75 000 ЕРР могут быть обеспечены таким способом по крайней мере до 2020 года. Наличие урана-236 в частицах НОУ и ВОУ в поставленных Пакистаном компонентах центрифуг в Иран и Ливию позволяют предположить, что Пакистан мог в начале своей программы обогащать некоторое количество переработанного урана.

В зависимости от мощностей обогащения и, где это требуется, с переходом на использование обедненного урана и переработанного урана, Пакистан может накопить к 2020 году запасы обогащенного до 90 процентов урана для оружия в 2500 – 6000 кг. Если все три реактора в Хушабе будут иметь мощность в 50 МВт-тепл., то Пакистан может к 2020 году накопить также примерно 450 кг плутония. Эти запасы будут достаточными для возможного количества в 100 – 240 простых боеприпасов на делении на основе ВОУ и 90 плутониевых боеприпасов, предполагая 25 кг ВОУ или 5 кг плутония на боеприпас. Пакистан может изготовить больше боеприпасов, если он сможет добывать больше урана, или разработает более совершенные конструкции оружия, требующие меньше расщепляющихся материалов.

Пакистан может альтернативно перейти к схеме, в которой он использует свои 40 тонн природного урана в год для топлива трех реакторов в Хушабе, и затем обогащать переработанный уран из их отработанного топлива для изготовления ВОУ. Это может быть достигнуто с мощностями обогащения в 30 000 ЕРР при содержании урана-235 в отходах в 0.3 процента. Такая схема может в принципе работать в течение срока службы реакторов в Хушабе, до тех пор, пока Пакистан будет производить по крайней мере 40 тонн урана в год, и будет давать 35 кг плутония и 140 кг ВОУ в год. В таком сценарии много большие мощности обогащения останутся незагруженными.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Смотрите, например, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, *Uranium 2007: Resources Production and Demand*. (Vienna: OECD Publishing, 2008). На этот отчет, публикуемый два раза в год, обычно называют «Красной книгой» и этот термин часто используется в этой статье для ссылки на многие из этих полугодичных отчетов.
2. Ежегодные оценки глобального и национального производства расщепляющихся материалов и из запасов докладываются международной группой по расщепляющимся материалам. Самым последним является отчет "Global Fissile Material Report 2008, Scope and Verification of a Fissile Material (Cutoff) Treaty," <http://www.fissilematerials.org/ipfm/pages_us_en/documents/documents/documents.php> (на август 2009 года).
3. Z. Mian and A. H. Nayyar, International Panel on Fissile Materials, "Pakistan and the FMCT," *Towards a Global Ban on the Production of Fissile Materials for Nuclear Weapons: Country Perspectives on the Challenges to a Fissile Material (Cutoff) Treaty*, 1 October 2008 <http://www.fissilematerials.org/ipfimpages_us_en/documents/documents/documents.php> (на август 2009 года).
4. Оценку запасов индийских расщепляющихся материалов до 2020 года можно найти в работе R. Rajaraman, "Estimates of India's Fissile Material Stocks," *Science and Global Security* 16(3) (2008): 74-86.
5. Nazir Ahmad, "The Pakistan Atomic Energy Commission," *Pakistan Quarterly* 7(3) (1957): 14-17.
6. Mohamad Ashraf, "Uranium Prospecting in Pakistan," *The Nucleus* 1(4) (1964): 28-30.
7. M.Y. Moghal, "Uranium in Siwalik Sandstones, Sulaiman Range, Pakistan, Formation of Ore Bodies" (Proceedings of A Symposium on the Formation of Uranium Ore Deposits, Athens, 6-10 May 1974), 383-403.

8. F.A. Shams, F. Barthel, and H. Fohse, *Geology of Pakistan*, ed. F.K. Bender and H.A. Raza. (Berlin: Gebruder Borntraeger, 1995), 222.
9. Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency, *World Uranium Geology and Resource Potential: International Uranium Resources Evaluation Project* (San Francisco: Miller-Freeman Publications, 1980).
10. Muhammad Mansoor, "Nuclear Minerals in Pakistan," *The Nucleus* 42(1-2)(2005): 73-83.
11. Dera Ghazi Khan, "Irregularities in PAEC's project alleged," *Dawn* (Pakistan), 27 March 1998.
12. International Atomic Energy Agency, Nuclear Fuel Cycle Information System, <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/nfcms_infcis_NFCIS.html> (на август 2008 года).
13. Azim Kidwai, "Search for Nuclear Minerals," *Dawn* (Pakistan), 23 February 1979. В этой статье цитируется годовой отчет пакистанской Комиссии по атомной энергии.
14. Shahid-ur-Rehman, "Pakistanis tell of Indigenous U mining and Milling Effort," *Nuclear Fuel*, 1 December 1986.
15. International Atomic Energy Agency, *Pakistan, Country Nuclear Fuel Cycle Profiles, Second Edition*, Technical Reports Series No. 425 (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005). <<http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS425.web.pdf>> (на август 2009 года).
16. Dera Ghazi Khan, "Irregularities in PAEC's Project Alleged," *Dawn* (Pakistan), 27 March 1998.
17. Nadeem Saeed, "Villagers' Fears of Nuclear Waste," *BBC*, 28 April 2006, <news.bbc.co.uk/2/hi/southasia/4954730.stm> (на 17 августа 2009 года).
18. International Atomic Energy Agency, World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO) Database, <<http://nucleus.iaea.org/NUCLEUS/nucleus/Content/CatalogueOfInformationResources/NuclearFuelCycleandFuelMaterials/WorldDistributionofUraniumDeposits.html>> (на август 2008 года).
19. Muhammad Mansoor, "Nuclear Minerals in Pakistan," *The Nucleus*, 42(1-2)(2005): 73-83.
20. См. ссылку [15].
21. В таблице используются оценки "Красной книги" для Пакистана, сообщенные в 1990, 1997, 1999, 2005, и 2007 годах. Эти оценки были ретроспективно увеличены для того, чтобы включить производство 30 тонн урана в год от 1971 до 1980 года и продолжавшемся на этом более высоком уровне до 1991 года. См. Organisation for Economic Co-operation and Development, *Forty Years of Uranium Resources, Production, and Demand in Perspective, "The Red Book Retrospective"* (Vienna: OECD, 2006), Appendix 7.1, 256-257. В отчете "The Red Book Retrospective" не дается никакого объяснения для этого измерения. Это увеличение не согласуется, однако, с отчетами Комиссии по атомной энергии Пакистана, в которых говорится, что в Пакистане между 1971 и 1980 годами велась разведка и разработка, но не было крупномасштабной добычи урана. См., например, ссылки [13] и [19]. Поэтому мы опираемся на оригинальные оценки "Красной книги", а не на исправленные величины, предлагаемые в "The Red Book Retrospective." В этой работе также приводится общая оценка производства с 1980 по 2003 год в 721 тонну. Это на 130 тонн больше, чем приведенная здесь оценка, которая основана на индивидуальных выпусках «Красной книги».
22. Ihtasham ul Haque, "\$600m Plan to Explore and Mine Uranium" *Dawn* (Pakistan), 1 March 2007.
23. International Atomic Energy Agency Information Circular (INFCIRC), "Text of the Agreement of 2 March 1977 between the Agency and Pakistan for the Application of Safeguards in Connection with the supply of Uranium Concentrate," 248 (July 1977).
24. "If the Devil Asks (me) to Sell Him Uranium, Today, I'll Sell it to Him," *Nuclear Fuel*, 27 April 1981. Другие отчеты предполагают, что Пакистан импортировал 110 тонн урана из Нигера в 1979 году, который был декларирован и поставлен под гарантии. См. International Institute for Strategic Studies, Strategic Dossier, "Nuclear Black Markets: Pakistan, A.Q. Khan and the Rise of Proliferation Networks" (2007): 26.
25. Заявлялось, что Ливия приобрела у Нигера 1212 тонн урана и тайно поставила 200-300 тонн из этого Пакистану. David K. Willis, "The Uranium Flow: Who Controls It?" *The Christian Science Monitor*, 2 December 1981. См. также ссылку [24], International Institute for Strategic Studies.
26. Об импорте урана сообщалось в отчете International Atomic Energy Agency, "Implementation of the NPT Safeguards Agreement in the Socialist People's Libyan Arab Jamahiriya, Report by the General Director," GOV/2004/59 (2004): 3, <www.iaea.org/Publications/Documents/Board/2004/gov2004-59.pdf> (на август 2009 года). Подтверждение запасов приводится в от-

- чете International Atomic Energy Agency, "Implementation of the NPT Safeguards Agreement in the Socialist People's Libyan Arab Jamahiriya," GOV/2008/39 (12 September 2008), Annex, 1, <www.iaea.org/Publications/Documents/Board/2008/gov2008-39.pdf> (на август 2009 года).
27. А. К. Хан заявил, что в 1982 году Пакистан получил 10 тонн необогащенного и 5 тонн обогащенного до 3% гексафторида урана вместе с 50 кг ВОУ оружейного качества. Simon Henderson, "Nuclear Scandal-Dr. Abul Qadeer Khan," *The Sunday Times*, 20 September 2009, and R. Jeffrey Smith and Joby Warrick, "A Nuclear Powers Act of Proliferation," *Washington Post*, 13 November 2009.
28. S.M.N. Zaidi, "Making of N-Power Fuel in Pakistan," *The Nation*, 21 September 1990. Топливо для KANUPP было успешно произведено в 1980 году.
29. В первоначальном проекте KANUPP's средняя равновесная степень выгорания в активной зоне сначала была равна 8650 МВтд/т, но затем она была повторно рассчитана в 1995 году с использованием современных программ расчета физики реакторов как 7400 МВтд/т. Iqbal Ahmed, Waqar Butt, Zia ul Hasan Siddiqi, Javed Iqleem, "Plant Life Extension at Kanupp: An Update," *Nuclear Engineering International* (June 1997): 18-20.
30. Mark Hibbs, "After 30 Years, PAEC Fulfills Munir Khan's Plutonium Ambition," *Nucleonics Week*, 15 June 2000.
31. "Pakistan's Indigenous Nuclear Reactor Starts Up," *The Nation*, 13 April 1998.
32. "Pakistan is Reprocessing Fuel Rods to Create Plutonium Nuclear Weapons," *CBS News Transcripts* (6:30 PM ET), 16 March 2000. Дополнительные подробности приведены в Z. Mian and A.H. Nayyar, "An Initial Analysis of ⁸⁵Kr Production and Dispersion from Reprocessing in India and Pakistan," *Science and Global Security* 10(3) (2002): 151-179.
33. О втором реакторе в Хушабе сообщалось в июле 2006 года, смотрите David Albright and Paul Brannan, "Commercial Satellite Imagery Suggests Pakistan is Building a Second, Much Larger Plutonium Production Reactor: Is South Asia Headed for a Dramatic Buildup in Nuclear Arsenals?," Institute for Science and International Security (ISIS) 24 July 2006; and "U.S. Disputes Report on New Pakistan Reactor," *New York Times*, 3 August 2006. Изображения третьего реактора были опубликованы в июне 2007 года. David Albright and Paul Brannan, "Pakistan Appears to be Building a Third Plutonium Production Reactor at Khushab Nuclear Site," Institute for Science and International Security (ISIS) (21 June 2007). Изображение на рис. 2 взято из David Albright and Paul Brannan, "Update on Khushab Plutonium Production Reactor Construction Projects in Pakistan," Institute for Science and International Security (ISIS) 23 (April 2009).
34. См. ссылку [33], David Albright and Paul Brannan, "Pakistan Appears to be Building a Third Plutonium Production Reactor at Khushab Nuclear Site."
35. David Albright and Paul Brannan, "Second Khushab Plutonium Production Reactor Nears Completion," Institute For Science and International Security (ISIS) (18 September 2008).
36. См. ссылку [33], David Albright and Paul Brannan, "Commercial Satellite Imagery Suggests Pakistan is Building a Second, Much Larger Plutonium Production Reactor: Is South Asia Headed for a Dramatic Buildup in Nuclear Arsenals?"
37. Официальный представитель Пакистана описал заявление о том, что мощность реактора Хушаб-II составляет 1000 МВт-тепл., как «сильно преувеличенное». Цитировано в Joby Warrick, "Pakistani Reactor not as Significant as was Reported, Administration Says," *Washington Post*, 5 August 2006.
38. Дэвид Олбрайт и Пол Браннан понизили свои оценки с 1000 МВт-тепл. до примерно 100 МВт-тепл., см. ссылку [35]. Оценка Хушаб-II как "по крайней мере такого же большого, как Хушаб-I с мощностью класса 40 МВт-тепл., но меньше, чем реактор ДХРУВА класса 100 МВт-тепл." предлагается в работе Thomas Cochran "What is the Size of Khushab II?" National Resources Defense Council (September 2006).
39. Официальных представителей США цитируют в статье William J. Broad and David E. Sanger, "U.S. Disputes Report on New Pakistan Reactor," *New York Times*, 3 August 2006.
40. Если Хушаб II и III обладают мощностью по 100 МВт-тепл. каждый, то они вместе с Хушаб I будут потреблять 65 тонн урана в год.
41. David Albright, Paul Brannan, and Robert Kelley, "Pakistan Expanding Dera Ghazi Khan Nuclear Site: Time for U.S. to Call for Limits," Institute For Science and International Security (ISIS) (May 2009). Предприятие по производству ядерного топлива расположено в Кундиане, рядом с Чашма.

42. David Albright and Paul Brannan, "Pakistan Expanding Plutonium Separation Facility Near Rawalpindi," Imagery Brief, Institute For Science and International Security (ISIS) (May 2009).
43. David Albright and Paul Brannan, "Chashma Nuclear Site in Pakistan with Possible Reprocessing Plant," Imagery Brief, Institute For Science and International Security (January 2007).
44. См., например, David Albright, Frans Berkhout and William Walker, *Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996* (New York: SIPRI/Oxford University Press, 1997), 462, table A.1.
45. Отметим, что в 1 делении выделяется 207 МэВ, где 1 эВ = 1.6×10^{-19} Дж. Поскольку 1 Дж = 1Вт·с, отсюда следует, что 1 МВт·час = 3.6×10^9 Дж и поэтому 1 МВт·час соответствует 10^{20} делениям.
46. Мы признательны Александру Глезеру за сообщение результатов его расчетов по программе MCNP изотопного состава отработанного топлива на тяжеловодном реакторе с низкой степенью выгорания.
47. International Atomic Energy Agency, *Management of Reprocessed Uranium: Current Status and Future Prospects*, IAEA-TECDOC-1529 (2007), 17. Трансурановые изотопы включают Pu-238 Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242; Np-237; Am-241; Cm-242, Cm-244. Продукты деления включают Zr-95/Nb-95; Ru-103, Ru-106; Cs-134, Cs-137; and Tc-99. Химические примеси включают бор, кремний, ванадий, вольфрам, технеций, нептуний, рутений, хром и молибден.
48. См. ссылку [32].
49. См. ссылку [1], Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, *Uranium 2007, Resources Production and Demand*, 80. В «Красной книге» 2007 года сообщается, что «Извлечение урана при переработке отработанного топлива в прошлом производилось в нескольких странах, включая Бельгию и Японию. В настоящее время оно постоянно делается только во Франции и Российской Федерации, в основном из-за того, что повторное использование извлеченного урана является сравнительно дорогим предприятием, в основном из-за того, что оно требует специально выделенных установок для конверсии, обогащения и изготовления». Переработанный уран повторно обогащался и использовался в реакторах с водой под давлением в Германии, Франции, Японии, России, Великобритании, США, Бельгии, Испании, Швеции и Швейцарии. См. ссылку [47], стр. 17.
50. World Nuclear Association, "Processing of Used Nuclear Fuel" (March 2009). <<http://www.world-nuclear.org/info/inf69.html>> (на август 2009 года).
51. Данные для США смотрите в отчете U.S. Department of Energy, National Nuclear Security Administration, "Highly Enriched Uranium: Striking a Balance; A Historical Report on the United States Highly Enriched Uranium Production, Acquisition, and Utilization Activities from 1945 through September 30, 1996," Revision 1 (2001), публично выставленном в 2006 году <<http://www.fissilematerials.org/ipfm/sitejdown/doe01.pdf>> (на август 2009 года) и Lockheed Martin Energy Systems, Inc. Oak Ridge Y-12 Plant, "Initial Report on Characterization of Excess Highly Enriched Uranium, Nuclear Materials Management and Storage," Y/ES-086 (1996), <http://www.fissilematerials.org/ipfm/site_down/doe96b.pdf> (на август 2009 года). Данные по СССР смотрите в Oleg Bukharin, "Analysis of the Size and Quality of Uranium Inventories in Russia," *Science and Global Security* 6(1) (1996): 59-77, and E.H. Gift, National Security Programs Office, Martin Marietta Energy Systems, Inc. "Analysis of HEU samples from the ULBA Metallurgical Plant," revised in 1995 by A. W. Riedy <<http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp?purl=/192548-Ag02e9/webviewable/>> (на сентябрь 2009 года).
52. См. ссылку [47], стр. 32.
53. Samar Mubarakmand, in "Munir Ahmad Khan Memorial Reference," *Pakistan Military Consortium* (представленную докладчиками на мемориальном заседании, проведенном в память Мунир Ахмеда 28 октября 2007 года в Исламабаде), <<http://www.pakdef.info/pakmilitary/army/nuclear/memoria^munrahmed.html>> (на август 2009 года).
54. Shahid-ur Rehman, *Long Road to Chagai* (Islamabad: Printwise Publications, 1999), 50.
55. "German Firm Cited in Case Involving Sale of Fluoride Conversion Plant to Pakistan," *Nuclear Fuel*, 20 July 1981.
56. См. ссылку [54], стр. 59.
57. "Qadeer Terms Acquiring of Nuclear Technology a Miracle," *Dawn* (Pakistan), 27 May 2001.
58. "N-capability Acquired in 1983, says Qadeer," *Dawn* (Pakistan.), 30 May 1999; Rauf Siddiqi "Khan Boasts Pakistan Mastered Uranium Enrichment by 1982," *Nucleonics Week*, 20 May 1999.

59. "The Pakistan Nuclear Program," раскреденный материал для брифинга госдепартамента США, <<http://www.gwu.edu/~nsarchiv/NSAEBB/NSAEBB6/ipn22n.htm>> (на август 2009 года). Термин «существенное количество» для ВОУ обычно относится к стандарту МАГАТЭ в 25 кг материала, количеству, необходимому для простого импозивного оружия на делении первого поколения, но он не использовался в отчете в этом техническом смысле.
60. См. ссылку [44], стр. 274.
61. E. Koch, and S. Henderson, "Inside Kahuta," *Foreign Report, The Economist* (May 1986) 275, fn. 65. Цехи обогащения были идентифицированы как два больших здания слева и справа на картинке брифинга Госдепартамента США в сентябре 2005 года, <http://abcnews.go.com/images/International/iran_nuclear_report.pdf> (на август 2009 года).
62. A. F. Ameen, цитировано в S. Khan, "Fear of U.S. Aid Cutoff Said to Have Deterred Pakistan's Bomb Program," *Nuclear Fuel*, 11 August 1986.
63. Mark Hibbs, "Khan Network sought CNOR Bearings Long after KRL Gave up Centrifuge," *Nuclear Fuel*, 26 September, 2005.
64. Anwar Iqbal, "Pakistan can Explode H-bomb: A Q Khan," *The News International* (Pakistan), 30 May, 1998; "Nuclear Tests Ensured Country's Impregnable Defense: Qadeer," *The News International* (Pakistan), 27 May 2001.
65. National Security Archives, "U.S. Nuclear Non-proliferation Policy: 1945-91," Document no. 02328 (1992), quoted in Albright et al., *op cit.*, 273.
66. "A Bomb Ticks in Pakistan," *New York Times Magazine*, 6 March 1988.
67. S. Levine, "Bhutto says Pakistan can Build Nuclear Weapons," *The Guardian*, 2 September 1991.
68. "Summary of Substantial Facts," *Charge Sheet, The State versus Daniel Geiges and Gerhard Wisser*, High Court of South Africa, Transvaal Provincial Division, 2006, Sections 6.19 and 6.20.
69. См. ссылку [44], стр. 275. См. также Mark Hibbs, "India and Pakistan Fail to Include New SWU Plants on Exchanged Lists," *Nuclear Fuel*, 30 March 1992.
70. Дополнением Саймингтона был раздел 620(s) Закона об иностранной помощи 1967 года. Дополнение требовало от Президента приостановить экономическую помощь, если, по его мнению, получающая страна избыточно и без необходимости переводит ресурсы на военные расходы. Дополнение Пресслера было новым разделом 620(e) Закона об иностранной помощи 1985 года. Пресслер запрещал предоставление помощи или военных поставок Пакистану, если только Президент не будет предоставлять ежегодное свидетельство того, что Пакистан не обладает ядерным взрывным устройством.
71. Michael R. Gordon, "Congress Delays New Pakistan Aid amid Nuclear Rift," *New York Times*, 30 September 1987.
72. M. Hussein, "Nuclear Issue: Ball is Now in Pakistan's Court," *The Nation* (Lahore), 29 November 1990.
73. R. Jeffrey Smith, "Pakistan Official Affirms Capacity For Nuclear Device; Foreign Minister Vows to Contain Technology," *The Washington Post*, 7 February 1992.
74. В интервью BBC «Трудные переговоры с Пакистаном» от 10 февраля 2004 года сообщалось, что генерал Мирза Аслам Бег говорил, что «Мы понизили его от 95 процентов и выше, что является обогащением для оружейного качества, до 5 процентов, и ниже, ... что является обогащением коммерческого качества. ... И если вы знаете, как работает центрифуга, если вы хотите подняться до 95 процентов, вам следует дать машине поработать еще две недели, и вы получите аемь материал, который вы хотите». Цитировано в "Pak Army Never Controlled Nuclear Programme: Mirza Aslam Beg," *Rediff News*, February 11, 2004 <<http://in.rediff.com/news/2004/feb/10pak2.htm>> (на август 2009 года).
75. Mark Hibbs, "U.S. Now Believes Pakistan to Use Khushab Plutonium in Bomb Program," *Nucleonics Week*, 16 July 1998. Дэвид Олбрайт заявляет, «На начало 1998 года не было известно, возобновил ли Пакистан производство ВОУ». *Fact Sheet: India and Pakistan—Current and Potential Nuclear Arsenals*, 13 May 1998, <<http://www.globalsecurity.org/wmd/library/news/pakistan/1998/980513-ISIS1.htm>> (на 18 августа 2009 года).
76. "Nuclear Black Markets: Pakistan, A. Q. Khan and the Rise of Proliferation Networks," International Institute of Strategic Studies, Strategic Dossier, London, 2007.
77. Mark Hibbs, "China Said Aiding Kahuta Project," *Nucleonics Week*, 8 February 1996.

78. Mark Hibbs, "Pakistan Developed More Powerful Centrifuges," *Nuclear Fuel*, 29 January 2007; Mark Hibbs, "P-4 Centrifuge Raised Intelligence Concerns about Post-1975 Data Theft," *Nucleonics Week*, 15 February 2007.
79. David Albright, "ISIS Estimates of Unirradiated Fissile Material in De Facto Nuclear Weapon States, Produced in Nuclear Weapon Programs," Institute for Science and International Security (April 2004), Revised June 2005.
80. Обогащительные установки в Сихала, Голпра и Гадвале, соответственно описываемые как «опытная установка», «испытательная установка» и «обогащительный завод», были перечислены, например, в монографии Joseph Cirincione, Jon. B. Wolfstal and Miriam Rajkumar, *Deadly Arsenals: Nuclear, Biological and Chemical Threats* (Washington D.C.: Carnegie Endowment for International Peace, 2005), 256-257. В 1998 году Департамент торговли США перечислил установки с «ультрацентрифугами» в Сихала и Голпра и «обогащительный завод» в Гадвале в качестве предмета для экспортных ограничений. U.S. Department of Commerce, Bureau of Industry and Security, 15 CFR Part 742 and 744, *Federal Register*, vol. 63. No. 223, 19 November 1998, <<http://www.bis.doc.gov/pdf/india-pakistanentities-nov98.pdf>> (на август 2009 года).
81. О Гадвале как площадке для обогащения урана до оружейного качества можно прочесть в Jonathan Landay, "Despite Taliban Turmoil, Pakistan Expands Nuke Plants," *McClatchy Newspapers*, 1 May 2009; <<http://www.mcclatchydc.com/world/story/67379.html>> (на август 2009 года).
82. Sajid Chaudhry, "CDWP okays Rs 13.7bn N-fuel enrichment plant," *Daily Times*, 27 July 2007. Предполагалось, что завод будет иметь начальную производительность примерно в 150 000 ЕРР в год, которая будет увеличена в три последующих этапа по 150 000 ЕРР/год каждый к 2030 году, всего до 600 000 ЕРР.
83. Humayun Farshori, "National Energy Needs" (доклад на форуме развития Пакистана, 26 апреля 2005 года, Исламабад), <<http://siteresources.worldbank.org/PAKISTANEXTN/Resources/293051-1114424648263/Session-VII-Energy.pdf>> (на август 2009 года).
84. Экспортные руководящие указания группы ядерных поставщиков можно найти в <www.nuclearsuppliersgroup.org/guide.htm> (на август 2009 года).
85. См. например, Allan S. Krass, Peter Boskma, Boelie Elzen and Wim A. Smit, *Uranium Enrichment and Nuclear Weapon Proliferation* (New York: Taylor and Francis, 1983).
86. Обеднение отходов до 0,1 процента практикуется, например, в деятельности Росатома по обогащению урана в России, который производит отходы обедненного урана, содержащие 0.2 процента урана-235, которые обедняются еще дальше до отходов в 0.1 процента. Oleg Bukharin, "Russia's Gaseous Centrifuge Technology and Uranium Enrichment Complex," Program on Science and Global Security Princeton University (January 2004), <www.ransac.org/Documents/bukharinrussianenrichmentcomplexjan2004.pdf> (на август 2009 года).
87. "Pakistan joins DU producer nations," *International Defense Digest* 34(5) (2001): 1.
88. См. ссылку [21]. Если имелись дополнительные 130 тонн природного урана, которые были произведены между 1980 и 2003 годами, как это предполагалось, то поставка сырья природного урана должна была продолжаться до 2009 года.
89. См. ссылку [21]. Обогащение дополнительных 130 тонн природного урана, как это предполагалось, произвело бы дополнительный обедненный уран, который продолжал бы использоваться как сырье до 2020 года и позже.
90. Дополнительные 130 тонн природного урана будут означать, что поставка сырья природного урана будет продолжаться еще один год.
91. International Atomic Energy Agency, "Implementation of the NPT Safeguards Agreement in the Islamic Republic of Iran," GOV/2004/83, 15 November 2004, 9.
92. International Atomic Energy Agency, "Implementation of the NPT Safeguards Agreement of the Socialist People's Libyan Arab Jamahiriya," GOV/2004/33, 28 May 2004, Annex 1, 5.