

## ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВА ОРУЖЕЙНОГО ПЛУТОНИЯ В КИТАЕ

*Дэвид Райт и Лисбет Гронлунд*

В статье обсуждается история производства плутония для ядерного оружия в Китае. Эта история и аналогии с процессом производства в США и России применены для приблизительного подсчета количества плутония, полученного Китаем на двух известных предприятиях. Такой анализ приводит к оценке, что Китай произвел от двух до пяти тонн плутония на этих предприятиях до того, как производство плутония прекратилось где-то в 1990 г. В статье показано, как проводился анализ и какие предположения были сделаны, чтобы читатель смог понять, как повлияют на результаты различные допущения или новая информация, которая может оказаться доступной.

Если принять во внимание отсутствие информации о большинстве аспектов китайской программы ядерного оружия, разработанная в статье оценка производства плутония неизбежно оказывается приблизительной. Впрочем, даже грубая оценка интересна, поскольку размер китайского арсенала делящихся материалов повлияет на готовность Китая присоединиться к многосторонней конвенции о запрещении дальнейшего производства делящихся материалов для оружия или для хранения без гарантий.

Авторы совместно руководят программой всеобщей безопасности в Союзе обеспокоенных ученых (США), а также участвуют в программе исследования безопасности при Массачусетском технологическом институте (Кембридж, Массачусетс, США). Адрес электронной почты: [dwright@ucsusa.org](mailto:dwright@ucsusa.org).

## ИСТОРИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛУТОНИЯ В КИТАЕ

Плутоний получается при облучении урана-238 в ядерных реакторах и затем извлекается из смеси с ураном и продуктами деления, которые образуются при делении урана и плутония. Поэтому производственный комплекс должен содержать промышленный реактор и предприятие для переработки топлива с целью выделения плутония.

Как считается, Китай производил оружейный плутоний на двух предприятиях: (1) комплекс по атомной энергетике в Цзючжане (его называют также заводом 404 или предприятием в Джумене, Субэй по названию близлежащего города и провинции), где первый промышленный реактор начал работать в конце 1966 г.; (2) предприятие в Гуаньчжуне (или завод 821) – одно из предприятий т.н. «третьей линии», которое, по-видимому, начало действовать в середине 70-х гг. В этой статье мы поначалу расскажем об истории предприятий, а затем оценим их производительность. Наше обсуждение китайского производственного комплекса основано главным образом на информации, полученной из официальной китайской истории национальной ядерной промышленности<sup>1</sup>, и на работе Льюиса и Ксю<sup>2</sup>.

### Предприятие в Цзючжане

Китай получал техническую помощь для разработки промышленного плутониевого реактора из СССР в конце 50-х гг. Сооружение первого реактора советской конструкции началось в марте 1960 г. В августе этого года СССР прекратил техническую помощь, когда сооружение только началось, не поставив большей части обещанного оборудования и проектных

<sup>1</sup> *Китай сегодня – ядерная промышленность*, ред. Ли Джу и др., изд. первое (Пекин. 1987) – на китайском языке. Отдельные выборки переведены на английский язык информационной службой иностранных радиопередач Министерства торговли США.

<sup>2</sup> (a) John Lewis and Xue Litai, *China Builds the Bomb* (Stanford, CA: Stanford University Press, 1988); (b) John Lewis and Xue Litai, “Chinese Strategic Weapons and the Plutonium Option”, *Critical Technologies Newsletters*, U.S. Department of Energy, Office of Classification and Technology Policy (DOE/OTPC/CTN-88-004/005), April/May 1988, pp. 4-14.

чертежей, которые Китай теперь был вынужден изготавливать сам<sup>3</sup>. Реактор охлаждался легкой водой, замедлителем служил графит, а топливом – естественный уран<sup>4</sup>. Топливные элементы, судя по сообщениям, поначалу имели следующий вид: стержни из естественного урана помещались в алюминиевую оболочку, причем между ураном и алюминием располагалась никелевая прокладка для улучшения теплопроводности<sup>5</sup>.

Советские промышленные реакторы, построенные в начале 50-х гг. в Челябинске, аналогичны первым американским промышленным реакторам в Хэнфорде<sup>6</sup>. Если именно эта конструкция стала основой для китайского реактора, то он, вероятно, также аналогичен реакторам в Хэнфорде. Впрочем, китайский проект может также быть основан на советском реакторе, запущенном в 1995 г. в Томске<sup>7</sup>.

Первая цепная реакция на реакторе в Цзючжане была получена в октябре 1966 г., а к концу года мощность реактора достигла, как сообщалось, 0.5% от проектного максимума. В книге *Китай сегодня*<sup>1</sup> история работы реактора разбита на три этапа<sup>8</sup>:

1) с 1967 г. до середины 1975 г., когда ученые набирали опыт, работая с реактором и улучшая оборудование – как сообщалось, они достигли проектной производительности реактора;

2) с середины 1975 г. по 1980 г., когда производительность реактора превзошла номинальную проектную величину;

3) с 1981 г. до середины 80-х гг. (в это время была написана книга *Китай сегодня*) – за это время реактор был усовершенствован для параллельной выработки гражданской электроэнергии. (Похоже, что разделение второго и третьего этапов в 1980 г. просто соответствует срокам пятилетнего планирования в Китае.)

Первый этап характеризовался частыми неудачами разных подсистем, Поначалу каждый ремонт реактора требовал его остановки, но после 1970 г. число остановок, судя по сообщениям, уменьшилось и поэтому возросла доля времени, когда реактор работал<sup>9</sup>. Крупные аварии и операции по уходу за реактором привели к тому, что в течение почти всего 1974 г. реактор не работал. Но, судя по сообщениям, в первой половине 1975 г. реактор впервые достиг проектной мощности. Сообщалось, что работа прерывалась в конце 60-х гг. и в начале 70-х гг. из-за беспорядков, вызванных культурной революцией<sup>10</sup>.

Как сообщает *Китай сегодня*, на втором этапе реактор проработал хорошо и превзошел проектную мощность. Однако, как считают другие источники, реактору продолжали досаждала проблемы<sup>11</sup>.

Проведенные в 1975 г. проверки безопасности показали, как утверждает, что реактор

---

<sup>3</sup> (a) См. [1], стр.204; (b) см. [2a], стр. 112, (c) см. [2b], стр. 6-7. Авторы отмечают, что никакое из жизненно важного оборудования не было поставлено – речь шла о топливных элементах, основных насосах и теплообменниках, хотя СССР снабдил Китай «предварительной документацией» по конструкции топливных элементов, топливных каналов и других частей активной зоны.

<sup>4</sup> См. [1], стр.203.

<sup>5</sup> См. [1], стр.193.

<sup>6</sup> (a) David Holloway, *Stalin and the Bomb* (New Haven: Yale University Press, 1994), p.193; (b) Thomas B. Cochran, Robert S. Norris, and Oleg A. Bukharin, *Making the Russian Bomb: From Stalin to Yeltsin* (Boulder, CO: Westview Press, 1995), p.73. (c) Информация о реакторах в Хэнфорде приведена в книге Thomas B. Cochran, William M. Arkin, Robert S. Norris, and Milton M. Hoenig, *Nuclear Weapons Databook, Volume II: U.S. Nuclear Warhead Production* (Cambridge, MA: Ballinger, 1987), pp.58-68.

<sup>7</sup> Олег Бухарин (Принстонский университет), частное сообщение, декабрь 2002 г.

<sup>8</sup> За исключением особых замечаний материал этого раздела взят из [1], стр.210-215.

<sup>9</sup> Основной параметр, описывающий работу реактора, – это «коэффициент использования мощности» (КИМ), который равен отношению полной энергии, выработанной реактором за определенное время, к максимальной энергии, которую можно было бы получить за это же время при непрерывной работе с максимальной мощностью.

<sup>10</sup> См. [2b], стр. 12-13.

<sup>11</sup> David Albright, Frans Berkhout, and William Walker, *Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996: World Inventories, Capabilities, and Policies* (New York: Oxford University Press, 1997), p.76.

может работать на мощностях, превышающих проектные значения. В следующем году была начата программа, обращенная на два серьезные ограничения в проекте реактора: недостаточная охлаждающая способность и то, что *Китай сегодня* назвал «низкой реактивностью активной зоны». Следует отметить, что мощности, на которых работали первые американские и российские реакторы, значительно выросли со временем (от двух до девяти раз). Эти более высокие рабочие мощности оказались возможными, главным образом, благодаря усовершенствованиям в системе охлаждения, которая смогла снимать возросшее количество тепла, генерируемого в активной зоне при работе на повышенной мощности<sup>12</sup>. Описание изменений, сделанных в системе охлаждения цзючжанского реактора, наводит на мысль, что были предприняты аналогичные шаги – производительность системы охлаждения значительно выросла за это время благодаря установке насосов лучшего качества и более эффективных теплообменников. Похоже также, что градири были изготовлены с большим запасом относительно начальной проектной мощности.

Мощность реактора может быть увеличена также путем добавки к топливу некоторого количества слегка обогащенного урана. Такое топливо применялось на американском N-реакторе в Хэнфорде<sup>13</sup>. Мы не знаем, использовалось ли такое топливо в Китае, но это как раз может быть то, что имеет в виду *Китай сегодня*, говоря об увеличении реактивности активной зоны<sup>14</sup>. С другой стороны, увеличение реактивности может просто относиться к шагам по уменьшению потерь нейтронов. *Китай сегодня* утверждает, что, начиная с 1979 г., продолжавшиеся усовершенствования реактора, приводили к устойчивому повышению его производительности.

Сообщается также, что на втором этапе выросла степень удельного выгорания, а это значит, что топливо облучалось в реакторе в течение более продолжительного периода времени<sup>15</sup>. Возрастание удельного выгорания уменьшает количество топлива, использованного в реакторе для получения заданного количества плутония, и поэтому уменьшает как количество отработанного топлива, которое надо переработать, так и время, на которое останавливается реактор для перезагрузки топлива. Впрочем, возрастание удельного выгорания увеличивает долю Pu-240 в произведенном плутонии. Pu-240 спонтанно излучает нейтроны и поэтому применение плутония с повышенной концентрацией Pu-240 в ядерном оружии могло привести к слишком быстрому началу реакции деления в конструкциях атомной бомбы «ствольного типа» (такая бомба была сброшена на Нагасаки), что не позволило бы плутонию сжаться до оптимальной плотности. Подобная «преждевременная детонация» может привести к более низкой мощности оружия по сравнению с проектным значением<sup>16</sup>. Так называемый плутоний «оружейного качества» содержит не более 6% Pu-240 (это соответствует удельному выгоранию менее 700 МВт·день/т, а «сверхчистый» плутоний содержит

---

<sup>12</sup> В докладе Министерства энергетики США *Plutonium: The First 50 Years* (DOE/DP-0137), February 1996, p.30 утверждается, что аналогичное увеличение мощности на реакторах в Саванна Ривер явилось результатом «инженерных усилий, установки более крупных насосов, большего числа теплообменников, больших по размеру труб, а также оптимизации физики реактора, конструкции внутренних потоков охладителя и улучшения конструкции топливных элементов».

<sup>13</sup> См. [6с], стр.66. Можно также добавить кольцо топливных элементов, содержащих ВОУ, вокруг внешней части активной зоны, чтобы увеличить поток нейтронов в этом районе и тем самым сделать профиль потока в активной зоне более плоским (Том Кохрен, частное сообщение, 28 августа 1995 г.).

<sup>14</sup> Китай впервые получил ВОУ в 1961 г. (см. [11], стр.126). Неизвестно, использовал ли он часть обогатительного потенциала, чтобы изготавливать топливо для промышленных плутониевых реакторов, кроме производства ВОУ для оружия.

<sup>15</sup> «Удельное выгорание» реакторного топлива – это мера той доли топлива, которая сгорела. Часто его выражают в единицах тепловой энергии, произведенной при делении и приходящейся на начальную массу топлива. Характерная единица измерения – мегаватт-день на тонну топлива (МВт·д/т).

<sup>16</sup> (a) Дж. Карсон Марк, «Взрывные свойства реакторного плутония», *Наука и всеобщая безопасность*, т.4, выпуск 1, 1994 г. (b) E.Kankeleit, C.Kuppers, and U.Imkeller, “Report on the Usability of Reactor Plutonium in Weapons” (in German), Institute fur Kernphysik, Technische Hochschule Darmstadt, December 1989.

менее 2-3% Pu-240 (это соответствует удельному выгоранию 200-300 МВт-день/т). (Смотрите Приложение А).

В США плутониевые промышленные реакторы поначалу работали при низком уровне выгорания. Как показывают оценки, в первой американской атомной бомбе, взорванной при испытании «Троица», применялся плутоний, содержащий только 1-2% Pu-240<sup>17</sup>. Впрочем, считается, что значительная часть современного американского ядерного оружия использует плутоний с 5-6 % Pu-240 (это соответствует уровню выгорания 550-670 МВт-день/т)<sup>18</sup>. Как и США, Китай сначала мог настроить работу своих реакторов на низкий уровень выгорания, чтобы получать сверхчистый плутоний. Но похоже, что Китай также поднял уровень выгорания и начал получать плутоний оружейного качества.

Поскольку плохая конструкция топливных элементов может привести к их распуханию и прогибу (если только они не работают при низком выгорании), это также говорит о том, что в первое время китайский реактор работал при низком уровне выгорания<sup>19</sup>. Льюис и Ксю утверждают, что увеличение охлаждения продлевает сроки работы топливных элементов, а это также могло помочь Китаю поднять удельное выгорание<sup>20</sup>.

Как заявляет *Китай сегодня*, в результате попыток увеличить время работы реактора был достигнут максимум, равный 244 дням в год. Говорится, что это выше проектного значения на 36 дней. (Однако неясно, относится ли термин «проектное значение» к конструкции реактора до или после модификации). Если реактор на втором этапе работал при полной мощности 5,5 лет, эти цифры приводят к проектному значению коэффициента использования мощности (КИМ), равному 0.57, и пиковому значению 0.67. Льюис и Ксю приводят более высокие значения. Они утверждают, что модификации реактора увеличили число рабочих дней реактора до 324 в год (от менее, чем 290)<sup>21</sup>. Отметим, что при оценках количества плутония, полученного на первых реакторах США в Хэнфорде, использовались значения КИМ в интервале 0.7-0.8<sup>22</sup>.

Сообщалось, что в 1981 г. Китай начал изучение возможности конверсии реактора для одновременного получения как плутония, так и электроэнергии. Соответствующая модификация реактора началась в 1983 г. Эти изменения должны были привести к остановке реактора на какое-то время, но нет оснований полагать, что работа по двум направлениям уменьшила производство плутония, как только реактор снова вошел в строй. Могли также продолжаться изменения для увеличения мощности реактора. Хотя такая деятельность явно не обсуждается в книге *Китай сегодня*, там утверждается, что расширенная программа работы реактора потребует «улучшения параметров в петле охлаждения», а это позволяет предполагать возможность продолжения работ по улучшению системы охлаждения, которые могли привести к более высокому значению рабочей мощности.

Как сообщалось, производство плутония на реакторе в Цзючжане завершилось в 1984 г.<sup>23</sup> Возможно, что реактор продолжал работать для выработки электроэнергии после того,

<sup>17</sup> Том Кохрен, частное сообщение, 15 января 1996 г. См. также [16a].

<sup>18</sup> Ядерное оружие можно сделать из плутония, содержащего более высокие количества Pu-240, но возросший уровень испускания нейтронов может вызвать опасность для здоровья и в некоторой степени усложняет конструкцию бомбы. В боеголовках американских ракет для подлодок, как считается, применяется плутоний с очень низким содержанием Pu-240, чтобы уменьшить радиоактивную опасность для экипажей подлодок (Марвин Миллер, частное сообщение, 28 августа 1995 г.).

<sup>19</sup> У первого советского промышленного реактора в Челябинске (реактор «А») наблюдались такие же проблемы. См. [6a], стр.187 и [6b], стр.77.

<sup>20</sup> См. [2b], стр.9.

<sup>21</sup> Там же.

<sup>22</sup> См. [6c], стр.64 и подписи к табл.33, а также [6b], стр.277.

<sup>23</sup> (a) Mark Hibbs, "China Said to be Preparing for Decommissioning Defense Plants", *Nuclear Fuel*, 17 May 1999, p.11. (b) Zhang Hui, "A Discussion of China's Nuclear Transparency Options", *Proceedings of the 42<sup>nd</sup> Annual Meeting of the Institute for Nuclear Materials Management*, Northbrook, IL, 2001. Автор, похоже, утверждает, что производство на обоих китайских плутониевых промышленных реакторах завершилось где-то в 1991 г. Однако, он уточнил (частное сообщение, октябрь 2002 г.), что его понимание таково – все китайские плутониевые про-

как исчезли потребности в плутонии (аналогично тому, как это произошло в России). Согласно китайским исследованиям реактор в Цзючжане должен был иметь срок работы 30 лет. Это означает, что он должен был закрыться в 1995 г. или в 1996 г.<sup>24</sup>

### Переработка топлива на предприятии в Цзючжане

Китай впервые переработал свое отработанное топливо на «временном опытном заводе», который вступил в строй в октябре 1968 г. и был закрыт в начале 70-х гг.<sup>25</sup> Завод имел две параллельные производственные линии с проектной производительностью 400 кг отработанного топлива в день. Льюис и Ксю сообщили, что завод «в среднем работал с одной или двумя линиями непрерывно 250 дней в году»<sup>26</sup>. Если бы обе линии работали по 250 дней в год с проектной производительностью, то завод мог бы переработать максимум 100 тонн отработанного топлива в год, что соответствует примерно 50 кг плутония в год (при 6%-ном содержании Pu-240) или менее, чем 30 кг плутония в год (с содержанием Pu-240 не выше 3%). Поскольку такая максимальная производительность предполагает, что обе линии работали по 250 дней в год, реальная выработка завода, скорее всего, была меньше этих величин. В Приложении Б показано, что средняя ежегодная производительность, вероятно, ближе к 60 тоннам. Как заявляет *Китай сегодня*, производство плутония реально было ниже проектной величины. После того, как в 1970 г. заработал основной завод по переработке, опытный завод, судя по сообщениям, стал использоваться для других целей, отличных от извлечения плутония оружейного качества, но нет уверенности, что подобное извлечение прекратилось полностью. Использованный в первом испытании китайской плутониевой бомбы 27 декабря 1968 г. плутоний был произведен, как говорили, на опытном заводе<sup>27</sup>.

Сооружение основного перерабатывающего завода началось одновременно со строительством опытного завода. В результате не все полученные на опытном заводе уроки можно было учесть. Основной завод начал работать с апреля 1970 г., но операции не были надежными, а выработка оказалась низкой. Судя по сообщениям, эти проблемы были решены в начале 1972 г.<sup>28</sup> Дальнейшие усовершенствования на заводе увеличили его производительность до уровня, превышающего проектную величину на 40-50%. Поэтому есть основания предположить, что это предприятие способно переработать несколько сот тонн отработанного топлива в год (подробное обсуждение приводится в дальнейшем).

### Предприятие в Гуаньчжуне

В 60-е гг. и в начале 70-х гг. Китай начал сооружать несколько военных предприятий в отдаленных местах, которые предназначались для того, чтобы оказаться менее восприимчивыми к нападению по сравнению с первоначальными предприятиями, связанными с ядерным оружием. Их называют предприятиями «третьей линии». Судя по сообщениям, второй промышленный плутониевый комплекс был сооружен в Гуаньчжуне (провинция Сычуань). Мало что известно об этом предприятии, но считается, что там находятся самые крупные промышленный реактор и завод по химическому разделению<sup>29</sup>. Льюис и Ксю называют этот

---

мышленные реакторы прекратили работу где-то в 1991 г., но производство в Цзюджане прекратилось раньше.

<sup>24</sup> Сроки работы реактора зависят от многих причин. У реакторов с графитовым замедлителем одной из основных проблем оказывается распухание графита, связанное с высокой дозой облучения.

<sup>25</sup> (a) См. [1], стр.216. (b) В [23a] утверждается, что на заводе в Цзюджане применялся советский разделительный процесс, связанный с осаждением уранил-нитрата натрия. Впрочем, в [1] сообщается, что китайская программа началась в 1956 г. с намерением использовать советский метод, но вместо этого в 1964 г. Китай решил применять метод Pugex.

<sup>26</sup> См. [2b], стр.11.

<sup>27</sup> См. [2b], стр.9.

<sup>28</sup> См. [1], стр.232.

<sup>29</sup> (a) См. [11], стр.76. (b) Robert S. Norris, Andrew S. Burrows, and Richard W. Fieldhouse, *Nuclear Weapons Databook, Volume V: British, French and Chinese Nuclear Weapons* (Boulder, CO: Westview Press, 1994), p.350.

промышленный реактор «очень большим»<sup>30</sup>. Производство оружейного плутония на нем началось, по-видимому, в середине 70-х гг. и прекратилось, как считается, в конце 80-х гг. или в начале 90-х гг.<sup>31</sup>

## РАСЧЕТ ПРОИЗВОДСТВА КИТАЙСКОГО ВОЕННОГО ПЛУТОНИЯ

Диапазон опубликованных оценок производства китайского военного плутония очень широк. В первой своей книге по вычислению запасов делящихся веществ Олбрайт, Беркаут и Уолкер<sup>32</sup> оценили, что Китай произвел 1-4 т плутония. С другой стороны, Норрис, Барроуз и Филдхауз<sup>33</sup> дают оценку примерно в 4-7 т с верхним пределом 15 т. Различие этих вычислений вытекает, похоже, в основном из оценок мощности промышленных реакторов (этот вопрос будет обсуждаться далее) Мы попытаемся в этом разделе разработать независимую оценку. Количество плутония, произведенного в реакторе, зависит как от мощности реактора, так и от истории его работы. Количество плутония, которое можно получать ежегодно на реакторе, работающем с постоянной мощностью и с постоянным значением КИМ, можно рассчитать по формуле

$$X_{Pu} = C P_{th} \beta 365 \quad (1)$$

Здесь 365 – число дней в году,  $X_{Pu}$  – ежегодная выработка плутония (кг/год),  $C$  – значение КИМ (оно может лежать в интервале 0.5-1),  $P_{th}$  – тепловая мощность реактора (МВт),  $\beta$  – количество плутония, произведенное на 1 МВт·д работы реактора и зависящее от удельного выгорания топлива (и поэтому от доли Pu-240 в извлеченном плутонии). При уровнях выгорания, приводящих к содержанию Pu-240 в диапазоне 3-6%, значение  $\beta$  лежит в пределах  $9.0-8.5 \times 10^{-4}$  кг/МВт·д (т.е. менее одного грамма на МВт·д). (Смотрите Приложение А, где соответствующее значение для производства американского плутония в Хэнфорде составляло  $8.2 \times 10^{-4}$  кг/МВт·д<sup>34</sup>).

Мощность реактора, значение КИМ и удельное выгорание топлива будут, вообще говоря, меняться в течение срока работы реактора. Мы оценим эти величины, основываясь только на истории работы реактора в Цзючжане, кратко изложенной выше, а также на знании американской и советской производственных программ.

### Оценка мощности реактора в Цзючжане

Существует мало надежной информации о мощности любого из китайских промышленных реакторов. Для реактора в Цзючжане Олбрайт и др.<sup>35</sup> предполагают тепловую мощность в диапазоне 400-600 МВт. С другой стороны, Норрис и др.<sup>36</sup> утверждают, что реактор может обладать способностью производить 300-400 кг плутония ежегодно, а это потребует максимальной тепловой мощности 1400-1900 МВт при значении КИМ 0.7 и 6%-ном содержании плутония-240. Похоже, что эти цифры основаны на оценках оборонного разведывательного агентства США, которые, как представляется, получены в результате изучения спутниковых фотографий предприятия.

В ряде других ссылок также содержатся оценки мощности реактора или годового производства плутония, но надежность таких цифр сомнительна. Статья в лондонской *Санди Таймс* (1969 г.) принадлежала журналисту, который посетил Китай и утверждал на основа-

<sup>30</sup> См. [2b], стр.14.

<sup>31</sup> В [23a] сообщается, что производство плутония остановилось «в конце 80-х гг.». В [23b] заявляется на стр.350, что производство остановилось в 1991 г.

<sup>32</sup> David Albright, Frans Berkhout, and William Walker, *World Inventory of Plutonium and Highly Enriched Uranium 1992* (New York: Oxford University Press, 1993), p.46. Во втором издании этой книги использованы вычисления, выведенные в первоначальном варианте данной статьи.

<sup>33</sup> См. [29b], стр. 11 и 350.

<sup>34</sup> Том Кохрен, частное сообщение, январь 1996 г.

<sup>35</sup> См. [32], стр.46.

<sup>36</sup> См. [29b], стр. 11 и 350.

нии китайского источника, что предприятие в Цзючжане может производить более 300 кг плутония ежегодно<sup>37</sup>. Статья в *Чайна Бизнес Уикли* (1985 г) сообщала без ссылки на источник, что этот завод может производить до 400 кг плутония ежегодно<sup>38</sup>.

С другой стороны, немецкое исследование приводит более низкие цифры, утверждая, что тепловая мощность реактора в Цзючжане равна 600 МВт, а ежегодное производство плутония составляло 200 кг<sup>39</sup>. Отметим, что реактор может произвести 200 кг плутония в год, если только он работает при КИМ=1. Если предположить, что КИМ=0.7, а содержание плутония-240 составляет 6%, то от реактора при тепловой мощности 600 МВт можно получать ежегодно только 130 кг плутония, а ежегодное производство плутония в количестве 200 кг потребовало бы реактор с тепловой мощностью 900 МВт.

В качестве исходного сценария мы предположили, что начальная проектная тепловая мощность реактора составляла примерно 250 МВт, а дальнейшие улучшения могли примерно удвоить мощность. Как будет обсуждаться далее, эта оценка основана на трех факторах: (1) опыт США и СССР по работе со своими первыми промышленными плутониевыми реакторами; (2) размеры градирен на реакторе в Цзючжане; (3) производительность переработки в Цзючжане.

*Американский и советский опыт по работе со своими промышленными плутониевыми реакторами.* Первые американские промышленные реакторы в Хэнфорде, сооруженные в середине-конце 40-х гг., начинали работу при тепловой мощности 250 МВт. Затем мощность этих реакторов была поднята до 1440 МВт к концу 50-х гг., а в конечном итоге она превысила 2000 МВт<sup>40</sup>. Ранее указывалось, что китайский реактор мог быть основан на советской конструкции, которая считается аналогичной реакторам в Хэнфорде. Эти советские промышленные реакторы, вошедшие в строй в начале 50-х гг. в Челябинске, обладали начальной тепловой мощностью 300 МВт и в конце концов повысили ее до 1200 МВт. Как отмечалось выше, китайский реактор мог вместо этого быть основанным на конструкции советского промышленного реактора в Томске-7, который был запущен в конце 1955 г. с тепловой мощностью 600 МВт, возросшей со временем до 1200 МВт<sup>41</sup>.

По аналогии с американскими и российскими реакторами мощность китайского реактора, скорее всего, возрастала со временем и достигла, возможно, значительной величины.

*Градирни в Цзючжане.* Представляется возможным установить верхний предел на тепловую мощность реактора путем анализа фотографий градирен на реакторе в Цзючжане (рис.1) и спутниковой фотографии градирен (рис.2). Оба анализа говорят о том, что каждая из шести градирен может снять максимально до 100-200 МВт тепловой мощности реактора в зависимости от конструкции системы охлаждения<sup>42</sup>. Общепринято оставлять в резерве примерно треть градирен, так что в нормальных условиях две градирни могут не работать. Предположение о нормальной работе четырех градирен приводит к выводу, что охлаждение было адекватным для реактора с тепловой мощностью 400-800 МВт<sup>43</sup>. Следует помнить, впрочем, что (особенно для ранней конструкции) мощность охлаждения реактора может

<sup>37</sup> Francis James, "Mao's wild, wild west: China's nuclear Zone – first on the inside," *Sunday Times of London*, reprint in *Atlas*, August 1969, pp.19-23.

<sup>38</sup> Bradley Hahn, "China's Nuclear History", *The China Business Review*, July-August 1985, pp.28-31.

<sup>39</sup> Н.-М, Gobbel, *VR China: Atomwirtschaft und politik* (Munchen: Trikont-Verlag, 1980).

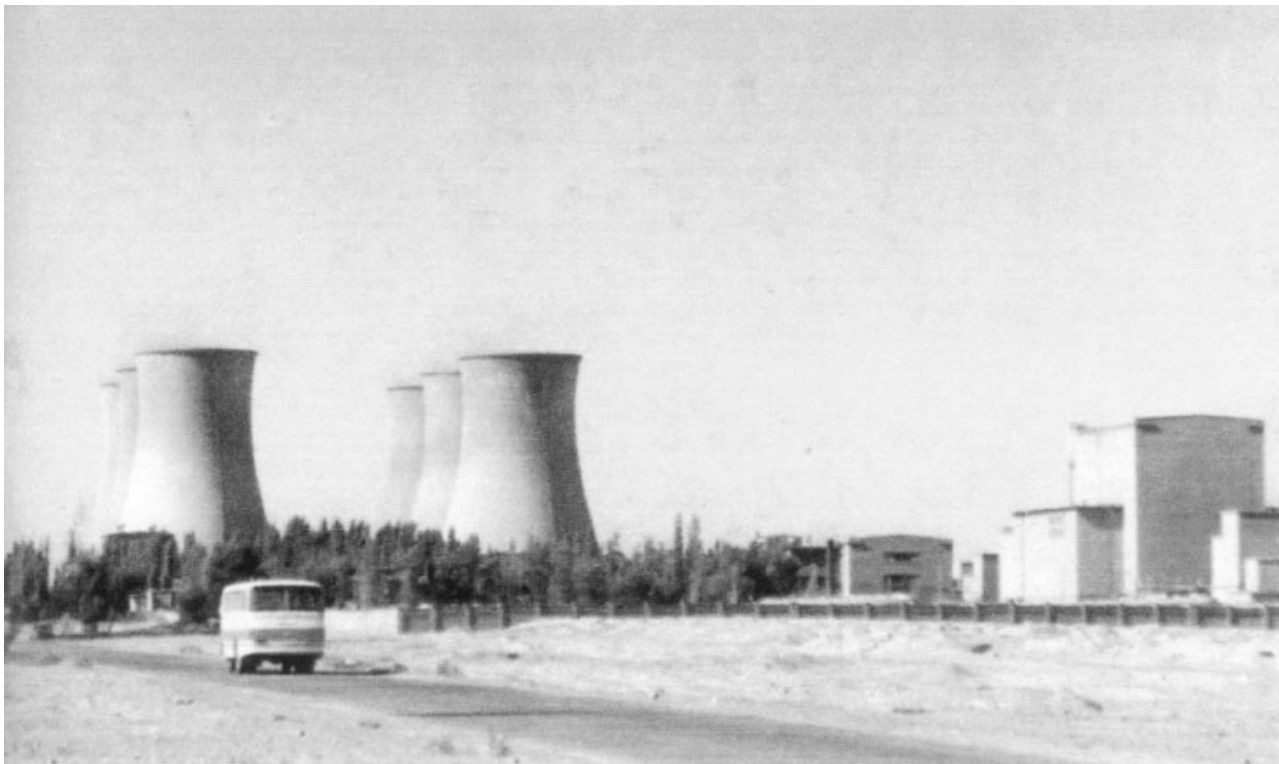
<sup>40</sup> См. [6с], стр.59-61.

<sup>41</sup> (a) Anatoli Diakov, "Disposition of Weapon-Grade Plutonium in Russia: Evaluation of Different Options," in Proceedings of the NATO conference "Dismantlement and Destruction of Chemical, Nuclear, and Conventional Weapons" (Kluwer Publisher, 1996); (b) Дьяков, частное сообщение, январь 1999 г.; (c) Бухарин, частное сообщение, декабрь 2002 г.

<sup>42</sup> Одна из оценок мощности охлаждения связана с частным сообщением источника из Министерства энергетики США (1995 г.) и составляет 100-200 МВт. Вторую оценку провел д-р Ху, который подсчитал, что максимальная мощность охлаждения градирни составит около 140Мвт (частное сообщение, 2002 г.).

<sup>43</sup> Д-р Ху подсчитал, что с учетом других потерь тепла четыре градирни смогли бы снять максимально до 650 МВт тепла. Он подсчитал, сравнивая с размерами градирен на советском реакторе в Томске-7, который считают аналогом реактора в Цзючжане, что мощность китайского реактора не превышает 600 МВт (частное сообщение, 2002 г.).

быть спроектирована с запасом. Поэтому фактическая мощность реактора могла оказаться меньше (и даже значительно меньше) максимального значения, обусловленного возможностями охлаждения.



**Рис.1:** Градирни для реактора в Цзючжане (*Китай сегодня*, рис.49.)

Впрочем, охлаждающая способность градирен накладывает верхний предел на тепловую мощность реактора. Если анализ возможностей градирен верен, то отбрасывается реактор с мощностью в диапазоне 1000-2000 Мвт и отбрасываются также высокие оценки ежегодного производства плутония, по крайней мере, для предприятия в Цзючжане.

На основе подобных рассуждений мы предполагаем в исходном сценарии, что после достижения начальной проектной мощности в 1975 г. (как сообщает *Китай сегодня*) уровень мощности на реакторе в Цзючжане примерно удвоился к концу 1982 г., когда реактор был остановлен для переделок, обеспечивших одновременное производство электроэнергии и плутония. Уровень тепловой мощности примерно в 500 МВт кажется совместимым с оценками мощности охлаждения градирнями и с периодом времени, за который американские промышленные реакторы удвоили свою мощность. Китай мог предпринять дальнейшие попытки по увеличению мощности реактора, но *Китай сегодня* ссылается только на модификации, позволяющие добиться одновременного производства электроэнергии. Поэтому мы предполагаем в рамках исходного сценария, что уровень тепловой мощности реактора после 1983 г. оставался приблизительно постоянным.



*Объем переработки топлива в Цзюджуне.* Объем переработки топлива в Цзюджуне также может дать информацию о мощности реактора. Опытный завод по переработке топлива был построен там для испытания метода типа "Rigex", пока шло сооружение более крупного завода. Как указано ранее, на опытном заводе имелись две параллельные производственные линии, а завод целиком мог обработать до 400 кг отработанного топлива в день. Это значит, что производительность каждой линии составляла до 200 кг/д. Как сообщалось, одна или обе линии работали полные 250 дней в год<sup>44</sup>. Такое утверждение подразумевает, что обе линии не работали одновременно полные 250 дней, так что производительность опытного завода лежала в интервале 50-100 т/г, если линии во время работы использовались на полной мощности. Более вероятно, что производительность лежит ближе к нижней границе этого интервала (смотрите Приложение Б).



**Рис.2:** Спутниковая фотография предприятия в Цзючжане. Ясно заметны градирни в левом нижнем углу. Похоже, что весь прямоугольный участок комплекса окружен забором. Реактор, как считается, находится чуть правее центра снимка. Рядом находится высокая вытяжная труба. (Снимок сделан в рамках рассекреченной американской программы «Корона» 30 мая 1972 г., спутник KH-4B с пространственным разрешением 1.8 м.)

Отработанное топливо от цзюджунского реактора не могло храниться больше, чем несколько месяцев, из-за коррозии и его было необходимо переработать в эти сроки. По этой причине объем производства опытного завода можно использовать для установления предела на начальную мощность реактора<sup>45</sup>. Действительно, полное количество отработанного топлива  $T$  (т), произведенного в реакторе за год, дается выражением

<sup>44</sup> См. [2b], стр.11.

<sup>45</sup> Этот аргумент принадлежит Олегу Бухарину (частное сообщение, декабрь 2002 г.).

$$T = 365 CP/B$$

(2)

Здесь 365 – число дней в году, С – среднее значение КИМ, Р (МВт) – средняя тепловая мощность реактора, а В (МВт·д/т) – удельное выгорание топлива. Если принять, что С = 0.4 (на ранней стадии работы реактора), и потребовать, чтобы Т было меньше, чем 60 т/г (значение Т не должно быть выше производительности завода по переработке), то из (2) следует, что мощность реактора должна была быть не выше, примерно, 280 МВт, если производился плутоний оружейного качества, или не превышать 100 МВт при производстве сверхчистого плутония. Как уже отмечалось, мы считаем, что Китай достаточно рано начал производить плутоний оружейного качества. Верхний предел на мощность реактора вырастет, если производительность завода по переработке была выше, чем предполагалось, или начальное значение КИМ оказалось ниже.

Текущая китайская программа по переработке гражданского ядерного топлива содержит опытный завод с аналогичной производительностью по тяжелому металлу (50 т/г), запуск которого запланирован на 2002 г. и за которым последует завод коммерческого типа на 400-800 т/г<sup>46</sup>. Если такое же масштабирование имело место в военном производстве, то производительность крупного военного перерабатывающего завода также могла находиться в диапазоне 400-800 тонн отработанного топлива в год (реальная производительность этого завода, конечно, могла бы оказаться и выше). Для оценки количества отработанного топлива, произведенного промышленным реактором, допустим, что реактор был способен производить плутоний оружейного качества (6% Pu-240 и удельное выгорание 600-700 МВт·д/т) при значении КИМ 0.65-0.70, а также сверхчистый плутоний (3% Pu-240 и удельное выгорание 300 МВт·д/т) при КИМ = 0.55-0.60<sup>47</sup>. При таких предположениях реактор с тепловой мощностью 500 МВт произведет 200-350 т/г отработанного топлива, а с мощностью 1500 МВт – 600-1500 т/г, где нижний предел соответствует производству плутония оружейного качества, а верхний – производству сверхчистого плутония.

Мы предполагаем, что основной завод по переработке был спроектирован на объем производства, достаточно превышающий количество отработанного топлива, которое можно было ожидать от реактора. Если завод был построен в предположении о переработке значительного количества сверхчистого плутония, то из приведенных оценок следует, что исключается реактор с большой мощностью порядка 1500 МВт. Впрочем, если основная часть переработанного материала – это плутоний оружейного качества, то потребуется более тщательная оценка возможностей завода по переработке, чтобы получить пригодный предел на мощность реактора.

Но с другой стороны, обсуждавшийся выше предел на мощность реактора, основанный на охлаждающих возможностях градирен, подсказывает, что перерабатывающий завод с производительностью 400 т/г оказался бы достаточным и что завод был спроектирован с производительностью, уровень которой лежит вблизи нижней границы приведенной выше оценки.

*Расчет производства плутония на предприятии в Цзюджане.* Для уточнения исходного сценария разобьем сроки работы цзюджанского реактора на три фазы.

Промоделируем тепловую мощность реактора следующим образом: (1) линейный рост от нуля до 250 МВт с конца 1966 г. до середины 1975 г.; (2) продолжение линейного роста до 500 МВт с середины 1975 г. до конца 1982 г. и (3) постоянное значение 500 МВт с 1983 г. до конца производства в 1984 г.

На основе сведений, представленных в книге *Китай сегодня*, предположим, что удельное выгорание топлива сначала было низким (примем значение 300 МВт·д/т), но оно возросло до 600 МВт·д/т в начале второй фазы. Допустим далее, что реактор был закрыт в течение

---

<sup>46</sup> Zhang Hui, "Economic Aspects of Civilian Reprocessing in China" in *Proceedings of the 42<sup>nd</sup> Annual Meeting of the Institute for Nuclear Materials Management*, Indian Wells, California, July 15-19, 2001, and Sun Donghui, "Backend of Nuclear Fuel Cycle in China," presentation at the 28<sup>th</sup> Japan Atomic Industrial Forum (JAIF) Annual Conference, April 1995.

<sup>47</sup> Снижение уровня выгорания увеличивает полное время на перезарядку, когда реактор надо останавливать.

1974 г. и не работал<sup>48</sup>, а также не работал в 1983 г., когда производились переделки для производства электроэнергии. Максимальное ежегодное значение КИМ на второй фазе составило, как говорилось, 0.67 (при проектном значении 0.57). Как было сказано, начальная фаза работы была омрачена частыми остановками, что уменьшило значение КИМ. Более того, невысокий уровень выгорания топлива в начальной фазе приводил к меньшему значению КИМ по сравнению с последующими фазами, если реактор приходилось закрывать для перезагрузки. Предположим для исходного сценария усредненное значение КИМ = 0.4 для первой фазы работы, 0.6 для второй и 0.65 для заключительной фазы. Поскольку мы допустили, что мощность реактора была очень низкой в начальный период, оценка производства плутония относительно мало чувствительна к значению КИМ для этого периода.

Если предполагается, что мощность изменяется линейно со временем на всех трех фазах работы, можно использовать (1), чтобы вывести следующее выражение для полного количества произведенного плутония за полное время работы реактора:

$$[C_1\beta_1Y_1P_1 + C_2\beta_2Y_2(P_1 + P_2) + C_3\beta_3Y_3(P_2 + P_3)] \quad (3)$$

Здесь для  $i$ -ой фазы  $C_i$  – среднее значение КИМ,  $\beta_i$  – количество плутония (кг), полученное на один МВт·д работы,  $Y_i$  – длительность (г) периода работы реактора, а  $P_i$  – тепловая мощность реактора на конец фазы.

Итак, в нашем исходном сценарии использованы следующие значения:

$$\begin{aligned} Y_1 = Y_2 = 7.5 \text{ лет}, Y_3 = 1 \text{ год}, \\ \beta_1 = 9 \times 10^{-4} \text{ кг/МВт}\cdot\text{д}, \beta_2 = \beta_3 = 8.5 \times 10^{-4} \text{ кг/МВт}\cdot\text{д}, \\ C_1 = 0.4, C_2 = 0.6, C_3 = 0.65, \\ P_1 = 250 \text{ МВт}, P_2 = P_3 = 500 \text{ МВт}. \end{aligned}$$

Эти значения приводят к подсчету количества плутония, произведенного за время существования реактора в Цзюджане, которое составило 0.75 т.

Для иллюстрации того, насколько чувствительна проведенная оценка к изменению значений разных параметров, рассмотрим несколько отклонений от исходного сценария.

Если предположить, что мощность реактора была меньше на 20% ( $P_1 = 200$  МВт и  $P_2 = 400$  МВт) при неизменных значениях остальных параметров, то производство плутония упало бы до 0.6 т. Если, напротив, мощность стала выше на 20% ( $P_1 = 300$  МВт и  $P_2 = 600$  МВт), то производство выросло бы до 0.9 т.

Вспомним из обсуждения охлаждающей мощности градирен, что мы оценили верхний предел тепловой мощности реактора в диапазоне 400-800 МВт. Если бы реактор непрерывно повышал свою мощность от 250 до 800 МВт ( $P_1 = 250$ ,  $P_2 = 500$ ,  $P_3 = 800$ ,  $Y_1 = 7.5$ ,  $Y_2 = 5$ ,  $Y_3 = 3.5$ ), производство плутония дошло бы до 0.93 т. Если бы начальная тепловая мощность составила 400 МВт, а затем выросла до 800 МВт ( $P_1 = 400$ ,  $P_2 = P_3 = 800$  МВт), полное производство плутония повышается до 1.2 т.

Если снова вернуться к исходному сценарию, то понижение значения КИМ до 0.3 при начальной фазе работы уменьшит полную оценку на 30 кг. При уменьшении значения КИМ на 0.1 при каждой фазе ( $C_1 = 0.4$ ,  $C_2 = 0.5$ ,  $C_3 = 0.55$ ) полная продукция уменьшится, примерно, на 0.1 т, а при их увеличении на такую же величину полная продукция также вырастет на 0.1 т.

Если бы вторая фаза продлилась на год по сравнению с исходным сценарием, полное производство вырастет до 0.82 т. Если же последняя фаза продлится два года вместо одного, объем продукции поднялся бы до 0.85 т.

Основываясь на этих цифрах и считая, что основные допущения, принятые в нашем исходном сценарии, в определенной степени верны, мы оцениваем полное производство плутония в Цзюджане в диапазоне от 0,5 т до 1.5 т. Впрочем, если наш анализ мощности реактора в значительной степени ошибочен или если реактор продолжал плохо работать после 1975 г. (как предполагают отдельные источники), реальное значение производства может выпасть из приведенного диапазона.

*Расчет производства плутония на предприятии в Гуаньчжуне.* Мало что известно о

<sup>48</sup> См. [1], стр.211.

предприятию в Гуаньчжуне. Важно отметить, что реактор, как считалось, начал работать в середине 70-х гг. и поэтому он сооружался одновременно с первой фазой работы реактора в Цзюджане, то есть до того, как цзюджанский реактор достиг своей проектной мощности. Поэтому не совсем понятно, до какой степени гуаньчжунский проект воспользовался опытом цзюджанского реактора. Более того, хотя в большинстве сообщений высказывается мысль, что реактор в Гуаньчжуне гораздо больше, чем реактор в Цзюджане, нет ясности, до какой степени Китай пытался расширить масштабы строительства в Цзюджане и построить более крупный реактор до того, как он набрал опыт на первом реакторе. Впрочем, опыт работы в Цзюджане мог помочь второму реактору более быстро вступить в строй и сократить нерабочее время.

Поэтому разумная модель второго реактора может выглядеть следующим образом: он умеренно превышал цзюджанский реактор, но обладал способностью быстрее набрать проектную мощность, а действия по повышению мощности проводились примерно параллельно действиям в Цзюджане. К тому же, второй реактор скорее всего работал с высоким удельным выгоранием большую часть своего рабочего срока (или даже весь срок). Однако мы подчеркиваем, что неопределенность в отношении мощности реактора приводит к значительной неопределенности определения производства плутония на этом реакторе.

На основе этой модели мы предлагаем в качестве исходного сценария, что второй реактор начал работать в 1975 г. с проектной тепловой мощностью 500 МВт, которая была достигнута через год работы, а затем мощность продолжала нарастать от 500 МВт до 1000 МВт за последующие семь лет работы. Далее допускается, что реактор проработал еще семь лет с мощностью 1000 МВт при слегка большим значением КИМ до момента закрытия где-то в 1990 г. Итак, в нашем исходном сценарии применяются следующие величины:

$$\begin{aligned} Y_1 &= 1 \text{ год}, Y_2 = Y_3 = 7 \text{ лет}; \\ \beta_1 &= \beta_2 = \beta_3 = 8.5 \times 10^{-4} \text{ кг/МВт}\cdot\text{д}; \\ C_1 &= 0.5, C_2 = 0.6, C_3 = 0.7; \\ P_1 &= 500 \text{ МВт}, P_2 = P_3 = 1000 \text{ МВт}. \end{aligned}$$

При таких оценках производство плутония составляет 2.5 т.

Как и раньше, подсчитаем различные отклонения от исходного сценария. Если бы начальная мощность реактора составила 400 МВт, а затем выросла до 800 МВт к концу второй фазы и далее оставалась неизменной, то продукция уменьшится до 2.0 т. При более медленном росте мощности по сравнению с исходным сценарием ( $P_2 = 750$  МВт и  $P_3 = 1000$  МВт) продукция упадет до 2.2 т. Если, напротив, мощность выросла бы до 1500 МВт к концу третьей фазы, то продукция составит 2.9 т.

Вернемся к исходному сценарию. Если проектная мощность была бы достигнута за два года ( $Y_1 = 2$  года,  $Y_2 = 7$  лет,  $Y_3 = 6$  лет), то продукция уменьшится на 0.1 т. Если в исходном сценарии третья фаза увеличилась бы на год, продукция вырастет на 0.2 т.

Изменение значения КИМ во второй или в третьей фазе на 0.1 приведет к изменению производства плутония на 0.2-0.3 т.

С учетом этих изменений наша оценка производства плутония в Гуаньчжуне составляет 1.5-3.5 т.

Таким образом, из наших расчетов следует, что полное производство плутония на двух предприятиях равно, грубо говоря, 2-5 т.

Важно помнить, что поскольку существует мало строгих фактов о китайских промышленных плутониевых предприятиях (в частности, о мощности и истории работы реакторов), эти значения, в лучшем случае, являются толчком для последующих размышлений. Например, ходили слухи, что на одном из промышленных предприятий в 70-е гг. произошел пожар, который причинил серьезный урон. Если это верно, то все наши подсчеты уменьшились бы и, возможно, значительно. Более того, похоже, что существенная часть китайского плутония была произведена на предприятии в Гуаньчжуне, о котором имеется очень мало открытых сведений. Как отмечалось выше, мощность реактора могла быть выше (вероятно, значительно), чем предполагается в статье.

Но по мере того, как поступает больше новой информации о предприятиях, можно применять приведенную в статье методологию для проведения более точных расчетов. Одним из источников информации, которая может оказаться полезной для установления предела

на мощность реактора в Гуаньчжуне, стала бы спутниковая фотография предприятия, чтобы провести анализ охлаждающих градирен.

Более детальные расчеты производства плутония на этих предприятиях потребуют также учета производства трития, поскольку использование реакторов для этой задачи уменьшает количество плутония, которое можно произвести на них.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В своей книге о запасах делящихся материалов Олбрайт, Беркаут и Уолкер считают, что полное количество плутония в китайском ядерном оружии составляет 1-2 т<sup>49</sup>. Этот расчет страдает неопределенностью, поскольку мало известно как о размере китайского ядерного арсенала, так и о количестве плутония в отдельной китайской ядерной боеголовке.

Наша оценка полного производства плутония (2-5 т) дает основания считать, что количество плутония, не содержащегося в ядерном оружии, составляет не более 4 т (возможно, намного меньше)<sup>50</sup>.

Размер запасов китайского плутония может повлиять на будущее расширение ядерного потенциала или в связи с планами его модернизации, или для ответа на развертывание американской системы ПРО. Например, если Китай увеличил бы число боеголовок на ракетах большой дальности с нынешнего уровня (примерно, 20 единиц) до 75-100 единиц, на что указывает оценка национальных разведывательных организаций США (декабрь 2001 г.)<sup>51</sup>, это может потребовать 0.2-0.4 т плутония (предполагается, что в таких боеголовках содержится по 3-5 кг плутония). Увеличение числа боеголовок на ракетах большой дальности до 200 единиц (это количество упоминается в докладе разведки США в 2000 г.<sup>52</sup>) потребует 0.6-0.9 т плутония.

Итак, если Китай не демонтирует некоторое количество боеголовок на системах с меньшей дальностью и заново использует плутоний, ограничения на запасы плутония могут установить предел тому, насколько он сможет расширять свой арсенал оружия большой дальности без возобновления производства плутония. Это может оказаться важным соображением для Китая, если он захочет оставить открытым вариант расширения своих ядерных сил в ответ на возможное развертывание американской системы ПРО. Действительно, хотя китайцы официально заявили в середине 90-х гг., что Китай больше не производит делящиеся материалы для оружия и не имеют планов для возобновления этой деятельности, Китай сопротивляется попыткам вести переговоры по готовящемуся договору о прекращении производства делящихся материалов<sup>53</sup>.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы хотят поблагодарить Дэвида Олбрайта, Тома Кохрена и Занга Ху за полезные обсуждения, а также Лю Джонга за помощь на ранних сроках работы и за перевод разделов книги *Китай сегодня*.

---

<sup>49</sup> См. [11], стр.77.

<sup>50</sup> Если у китайских боеголовок небольшой срок жизни, их придется перемонтировать относительно часто. Поэтому значительная часть китайского плутония может находиться на производственных конвейерах, а это уменьшает количество плутония, которое доступно для расширения китайского арсенала. (Олег Бухарин, частное сообщение, декабрь 2002 г.).

<sup>51</sup> National Intelligence Council, "Foreign Missile Development and the Ballistic Missile Threat Through 2015" (December 2001). <[http://cia.gov/nic/pubs/other\\_products/Unclassifiedballisticmisslefinal.htm](http://cia.gov/nic/pubs/other_products/Unclassifiedballisticmisslefinal.htm)>

<sup>52</sup> Steven Lee Myers, "U.S. Missile Plan Could Reportedly Provoke China", *New York Times*, 10 August 2000.

<sup>53</sup> См., например, Rebecca Johnson, "CD Closes 2002 Still Deadlocked", *Disarmament Diplomacy*, October-November 2002. <http://www.acronym.org.uk/dd/dd67/67cd/htm>.