

## **БАЙЕСОВСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБЪЕМА ПРОГРАММЫ ОБОГАЩЕНИЯ УРАНА В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ**

***Джон Е. Бистлайн, Дэвид М. Блум, Крис Риналди, Габриэль Шилдс-Эстрада,  
Зигфрид С. Хекер и М. Элизабет Пате-Корнелл***

В данной статье представлена модель для оценки производственных мощностей по обогащению урана в Северной Корее и определения возможных узких мест при расширении этих мощностей. Для идентификации и определения запасов ключевых материалов и компонентов для изготовления центрифуг используются экспертные оценки. Байесовские вероятностные сети используются для характеристики неопределенностей этих запасов, а детерминистическая модель оптимизации применяется для оценки производственных мощностей программы по обогащению урана в Северной Корее с учетом предполагаемых ограничений на компоненты и материалы. Для распространения неопределенностей в модели оптимизации используется метод Монте-Карло. Иллюстрация такого подхода, основанная на заключениях трех экспертов, позволяет предположить, что Северная Корея, возможно (с вероятностью около 80 процентов), обладает производственными мощностями по обогащению урана, большими, чем те, которые были представлены посетителям ядерного комплекса в Йонбене в 2010 году. Тремя наиболее важными узкими местами при увеличении производственных мощностей по обогащению урана являются доступность самоустанавливающихся подшипников, мартенситно-стареющей стали и высокопрочных алюминиевых сплавов. Природа модели позволяет легко обновлять ее по мере поступления новой информации о запасах материалов и компонентов для изготовления центрифуг.

Джон Е. Бистлайн, Крис Риналди, Зигфрид С. Хекер и М. Элизабет Пате-Корнелл работают в Департаменте науки и техники менеджмента Стэнфордского университета, Стэнфорд, Калифорния, США.

Дэвид Блум и Зигфрид С. Хекер работают в Центре международной безопасности и сотрудничества Стэнфордского университета, Стэнфорд, Калифорния, США.

Габриэль Шилдс-Эстрада работает в Бостонской консультативной группе, Чикаго, Иллинойс, США.

Почтовый адрес для корреспонденции: John E. Bistline, Department of Management Science and Engineering, Stanford University, Huang Engineering Center, 475 Via Ortega, Stanford, CA 94305, USA.

Адрес электронной почты: [bistline@stanford.edu](mailto:bistline@stanford.edu)

Статья получена 26 мая 2014 года и принята к публикации 3 февраля 2015 года.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В ноябре 2010 года официальные представители Корейской Народно-Демократической Республики (Северной Кореи) показали группе исследователей из Стэнфорда, в том числе и одному из авторов данной статьи, Зигфриду Хекеру, современную небольшую установку для обогащения урана на центрифугах в ядерном комплексе в Йонбене. Многие полагают, что эта программа обогащения началась в 1990-х годах, или даже раньше<sup>1</sup>. В 1990-х годах А.К. Хан из Пакистана продал Северной Корее стартовый комплект для центрифуг и примерно два десятка центрифуг, и обучил северокорейских технических специалистов работе с центрифугами в научно-исследовательской лаборатории Хана<sup>2</sup>. Северная Корея начала также интенсивную тайную операцию по закупке материалов и компонентов для центрифуг<sup>3</sup>. Центрифужная установка, расположенная в здании, где раньше изготавливались металлические топливные стержни, включала в себя, по оценке Хекера, около 2 000 центрифуг, объединенных в шести каскадах<sup>4</sup>. Северная Корея заявляла тогда, что установка работает и производит низко обогащенный уран (НОУ) для загрузки топлива в экспериментальный реактор с электрической мощностью 25–30 Мегаватт с обычной водой. После Пхеньян дал понять, что он будет переконфигурировать каскады центрифуг в Йонбене для того, чтобы производить высокообогащенный уран (ВОУ) вместо НОУ<sup>5</sup>. На основании количества и типа центрифуг можно оценить, что производственная мощность установки в Йонбене, перенастроенной на производство ВОУ оружейного качества, составляла в 2010 году

приблизительно 40 кг/год. Снимки со спутников показали, что размеры здания с центрифугами с 2010 года до августа 2013 года увеличились вдвое. Размеры установок с центрифугами невелики, так что их легко скрыть, а перспективы получения дополнительной информации с помощью агентурной разведки в Северной Корее весьма невелики. Для лиц, принимающих решения в США, важно оценить производственные мощности по обогащению урана в Северной Корее и препятствия на пути увеличения производства.

Производственные мощности по обогащению урана в Северной Корее измеряются в килограммах, умноженных на единицы работы разделения, за год (кг-ЕРР/год) и включают в себя потенциал обогащения урана на имеющихся установках с газовыми центрифугами, или на тех установках, которые могут вступить в строй в следующем году, с учетом резервных центрифуг. Эти производственные мощности оцениваются здесь как детерминированная функция от величины запасов компонентов центрифуг. Данная функция включает в себя оптимизацию использования компонентов в нескольких типах центрифуг для максимизации производственных мощностей обогащения.

В данной статье для косвенного определения производственных мощностей по обогащению урана в Северной Корее используются экспертные оценки закупок и запасов компонентов. Эти оценки были сделаны тремя экспертами из Стэнфордского университета во время проведения данного исследования (2014 год). Хекер и Энглерт предоставили оценку того, что должно будет считаться ключевыми компонентами и материалами для центрифуг, и тех позиций, которые могут наиболее вероятно приводить к появлению узких мест при изготовлении центрифуг в Северной Корее. Хекер и Браун представили оценки северокорейского импорта компонентов и материалов для центрифуг.

В следующем разделе определяются семь ключевых компонентов, сырьевых материалов, и производственного и испытательного оборудования для центрифуг обогащения урана, которые будут приняты как ограничивающие производственные мощности обогащения в Северной Корее (подробности приводятся в Приложении). В последующем разделе представлена модель вместе с методом учета неопределенностей в оценке запасов с использованием байесовских сетей для представления неполного знания информации о различных величинах и их условных зависимостях<sup>6</sup>. Байесовские сети позволяют определить вероятностные распределения размеров запасов компонентов, которые затем включаются в модель оптимизации центрифуг с использованием моделирования по методу Монте-Карло<sup>7</sup>. Результат, представленный в предпоследнем разделе, является вероятностным распределением производственной мощности обогащения (в кг-ЕРР/год), которое детерминированно относится к неопределенностям в величинах северокорейских запасов компонентов центрифуг.

Представленные здесь результаты основаны на информации из открытых источников, доступных авторам в 2014 году, и их следует рассматривать только как иллюстрацию предлагаемого подхода. Для того, чтобы в будущем использовать модель для поддержки принимаемых решений, надо будет регулярно обновлять входные параметры на основании разведывательной информации и новых или исправленных данных.

### Компоненты центрифуг

Схематическое представление о роторе центрифуги и самой газовой центрифуге показано на рисунке 1<sup>8</sup>. В конструкции газовой центрифуги требуется использовать несколько в высшей степени специфичных компонентов и материалов. Предполагается, что все компоненты либо производятся самостоятельно, либо импортируются как готовые изделия через систему закупок. Кроме того, многие компоненты должны будут пройти всесторонние испытания до того, как они будут использоваться в функционирующей центрифуге. По этим причинам был разработан перечень из 30 компонентов, сырьевых материалов и производственного и испытательного оборудования (в дальнейшем именуемых просто как "компоненты"), которые являются критическими для конструкции центрифуги; этот перечень приводится в таблице 1<sup>9</sup>.

Для того, чтобы уменьшить количество оценок вероятности и вычислительную сложность модели, два эксперта рассмотрели этот перечень компонентов и выделили из них те, которые могут представлять собой наиболее вероятные узкие места в производстве центрифуг в Северной Корее. Перед экспертами был поставлен вопрос, следует ли каждый из 30 компонентов исследовать дальше, как представляющий возможное узкое место в производстве, или же можно обоснованно предположить неограниченную доступность, и, следовательно, игнорировать такой компонент. Например, при сравнении откликов экспертов оказалось, что они согласились в том, что доступность уранового сырья не будет ограничивающим фактором.

Окончательно в перечень неопределенных параметров запасов модели (то есть, возможных узких мест в северокорейской программе центрифуг) были включены семь компонентов центрифуг. Таким образом, соответствующими случайными переменными стали количества этих компонентов и материалов, доступных Северной Корее для производства центрифуг. Этот окончательный перечень включает по крайней мере один

компонент из каждой из трех категорий компонентов, материалов и производственного и испытательного оборудования, необходимых в этом процессе, а именно:

- Высокопрочный алюминиевый сплав 7075
- Блоки контроллеров
- Мартенситно-стареющая сталь (сортов 250 и 350, учитывающихся как два материала)
- Самоустанавливающиеся подшипники
- Кольцевые магниты
- Специальные масла

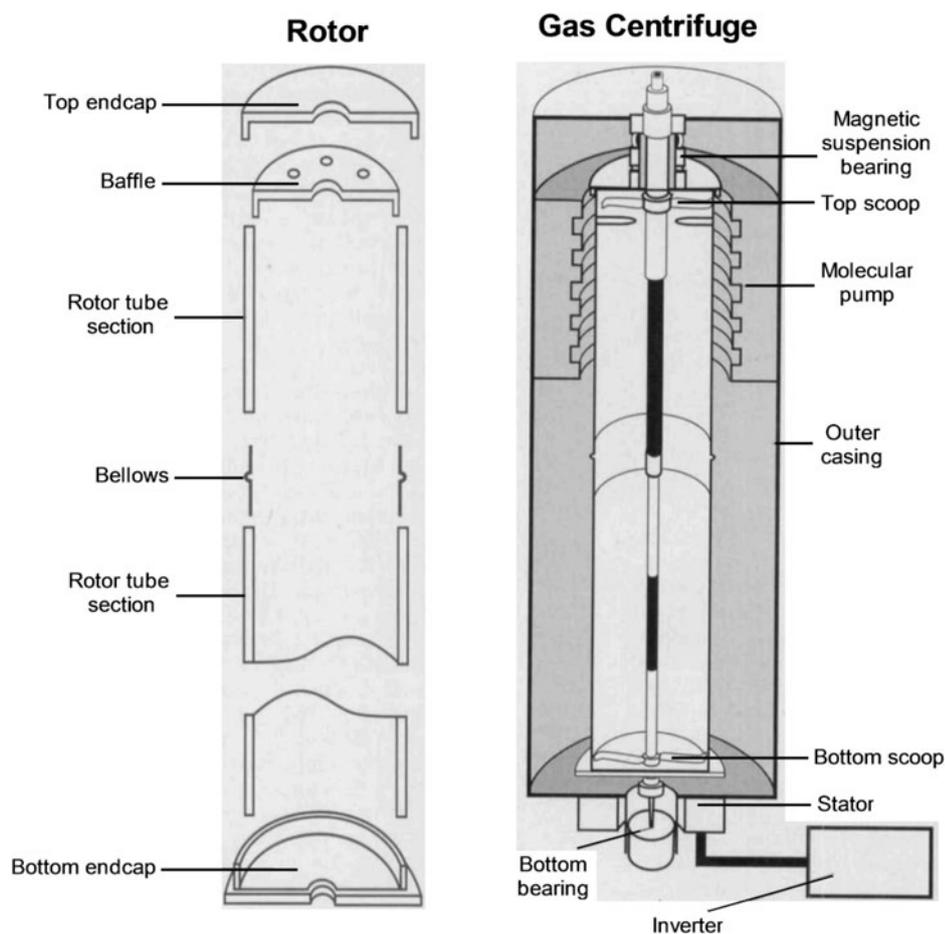


Рисунок 1. Схематическое представление ротора центрифуги (слева) и газовой центрифуги в целом (справа). Основано на статье Олбрайта и Хиббса<sup>9</sup>. Подписи на левой части рисунка (сверху вниз): 1 – ротор; 2 – верхняя концевая заглушка; 3 – экран; 4 – секция трубки ротора; 5 – сильфон; 6 – секция трубки ротора; 7 – нижняя концевая заглушка. Подписи на правой части рисунка (сверху вниз): 1 – газовая центрифуга; 2 – подшипник на магнитной подвеске; 3 – верхний газоулавливатель; 4 – молекулярный насос; 5 – внешний корпус; 6 – нижний газоулавливатель; 7 – статор; 8 – нижний подшипник; 9 – инвертер.

Прочие 23 компонента, показанные в таблице 1, предполагаются доступными в таких количествах, что они не будут сдерживающими ограничениями для производства центрифуг.

Для специальных масел и кольцевых магнитов предполагалась независимость от масштаба: северные корейцы либо могут получить неограниченное количество этих компонентов (производя их самостоятельно или импортируя их), либо не получают их вообще. Для специальных масел это вытекает из сравнительно малого количества масел, необходимых для смазки всех центрифуг установки. Для кольцевых магнитов такое предположение частично определяется тем фактом, что сырьевой материал самария, необходимый для изготовления кольцевых магнитов, широко доступен в Китае, но ограничения на изготовление затрудняют побуждение иностранной фирмы в нарушении международных норм<sup>11</sup>. Кольцевые магниты похожи на специальные

масла тем, что их относительно малые размеры требуют меньшего количества поставок при строительстве установки с центрифугами, по сравнению с другими компонентами, материалами и оборудованием из перечня. В модели частные контрактные соглашения с иностранными компаниями для изготовления кольцевых магнитов из китайского сырья, так же, как и получение специальных масел из любых источников, характеризуются как "отечественное производство". В рамках модели "отечественное производство" любого материала или компонента из таблицы АЗ (то есть, не только изделия, не зависящие от масштаба) трактуется как позиция "все или ничего". Каждой из этих возможностей приписывается своя вероятность.

Таблица 1. Компоненты, материалы и оборудование, необходимые для производства центрифуг.

Компоненты центрифуг	Изготовление и испытания	Материалы
Экраны	Токарные станки с ЧПУ типа CNC	Высокопрочный алюминиевый сплав
Корпуса центрифуг	Блоки контроллера	Эпоксидная смола "Araldite"
Трубки для охладителя	Машины формирования потока	Мартенситно-стареющая сталь (сортов 250 и 350)
Концевые заглушки	Расходомеры	Перфторполиэфирные масла
Модуляторы частоты	Магнитометры	Нержавеющая сталь
Магнитные подшипники	Масс-спектрометры	Уран
Молекулярные насосы	Мельницы	
Самоустанавливающиеся подшипники	Датчики давления	
Сильфоны	Оборудование балансировки ротора	
Трубки ротора	Вакуумные насосы	
Газоулавливатели		
Статоры		

### Вероятностная модель

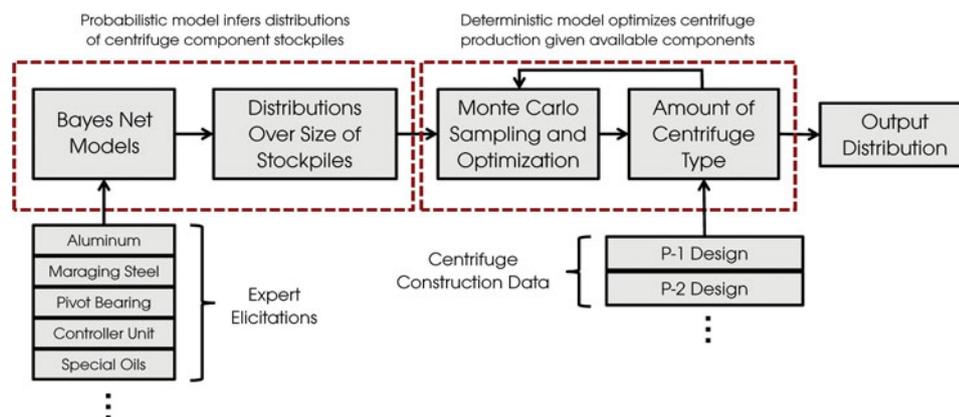
Как указано ранее, представленная здесь модель определяет текущее вероятностное распределение производственной мощности обогащения урана в Северной Корее, основанное на оценках возможности собственного производства и приобретения компонентов и материалов, относящихся к центрифугам. Оценки производственной мощности обогащения производятся распространением неопределенностей в компонентах и материалах с помощью детерминированной оптимизационной модели и моделированием методом Монте-Карло<sup>12</sup>. Такая оптимизация представляет собой максимизацию общей производственной мощности обогащения (в единицах кг-ЕРР/год) посредством выбора количества центрифуг каждой конструкции, как указано выше, которые могут быть изготовлены в зависимости от ограничений доступности запасов. На рисунке 2 показана структура модели. Левый блок представляет оценку вероятностных распределений запасов компонентов. Правый блок представляет соответствующее распределение производственной мощности центрифуг в Северной Корее в то время, когда была собрана информация.

Для каждого из неопределенных запасов, указанных в предыдущем разделе, для определения вероятностных распределений доступных количеств этих компонентов и материалов при помощи программы Netica<sup>TM</sup> создавались байесовские сети. Эти байесовские сети предоставляют структурированную модель неопределенностей (характеризующихся маргинальными и условными распределениями случайных переменных) и оценку распределений объема запасов на основании информации, полученной из заключений экспертов и анализа открытой информации по известным закупкам.

Полученные из этих сетей распределения (доступные величины) затем использовались в качестве входных параметров в программе моделирования по методу Монте-Карло в системе MATLAB<sup>®</sup>. Как отмечалось ранее, эта программа определяет сценарии наборов доступных компонентов, извлекая случайные величины из распределений каждого входного параметра. В свою очередь, модель оптимизации центрифуг определяет количество центрифуг типов Р-1 и Р-2 (переменные решения модели), при которых достигается максимум производственной мощности обогащения урана, используя сценарии, полученные при выборке по методу Монте-Карло, в качестве связывающих ограничений. В предположении, что в Северной Корее придерживаются похожей процедуры, этапы выборки и оптимизации повторяются до тех пор, пока их количество не станет достаточным для построения вероятностного распределения производственной мощности обогащения. Краткое описание данных, используемых в модели, приводится в Приложении.

По сравнению с другими оценками программы обогащения урана в Северной Корее такой подход уделяет

большее внимание явному количественному описанию неопределенности. Представленный Олбрайтом и Уолрондом подход, основанный на сценарии, позволяет рассчитать производство для нескольких альтернативных предположений об ядерной программе Северной Кореи и о ее намерениях<sup>13</sup>. Их анализ направлен на средние оценки текущих и будущих запасов урана оружейного качества и плутония. Хотя в отчете Олбрайта и Уолронда были определены правдоподобные верхние и нижние границы, их модель не определяла вероятности различных сценариев. В этом отчете предполагалось также присутствие небольшой полупромышленной установки во всех сценариях, кроме одного, и не принимались в расчет неопределенности в отношении масштаба и общей производственной мощности обогащения других установок. Поэтому полученные ими оценки, несмотря на их полезность, не позволяют количественно определить производственную мощность обогащения на основании дезагрегированных данных о компонентах и материалах для центрифуг, как это было сделано в представляемом здесь анализе. Кроме того, они не включали неопределенности в потенциальных запасах<sup>14</sup>.



Вероятностные модели выводят распределения запасов компонентов центрифуг		Детерминированные модели оптимизируют производство центрифуг с учетом доступных компонентов		
Модели байесовских сетей	Распределения объемов запасов	Выборки по Монте-Карло и оптимизация	Количество центрифуг по типам	Выходное распределение
Алюминиевые сплавы				
Мартенситно-старееющая сталь	Экспортные заключения	Данные по конструкции центрифуг	Конструкция P-1	
Самоустанавливающиеся подшипники			Конструкция P-2	
Блоки контроллеров				
Специальные масла				

Рисунок 2. Схема структуры модели от доступности материалов и компонентов до производственной мощности обогащения урана (где P-1 и P-2 обозначают типы центрифуг). Надписи на рисунке переводятся в приведенной выше таблице.

### Модель оптимизации центрифуг

Распределения, полученные с помощью байесовских сетей, используются в качестве входных параметров в моделировании по методу Монте-Карло, как это показано на рисунке 3. Случайные значения из выборки по методу Монте-Карло являются входными параметрами для модели оптимизации центрифуг, которая определяет оптимальное количество центрифуг каждого типа, которые могут быть изготовлены с учетом доступных запасов материалов, задающихся каждой случайной выборкой. Эти параметры модели включают количества позиций, необходимых для изготовления центрифуг различных типов. После этого модуль оптимизации определяет соответствующую производственную мощность обогащения урана. В модели рассматриваются три основных типа центрифуг, базирующихся на пакистанских конструкциях из исследовательской лаборатории Хана: конструкция P-1 (с алюминиевым ротором), конструкция P-2 (с ротором из мартенситно-старееющей стали сорта 350), и модифицированная конструкция P-2 (с ротором из мартенситно-старееющей стали сорта 250). Эта схема оптимизации позволяет выявить узкие места в производстве с помощью связывающих ограничений и рассчитать соответствующие скрытые цены таких ограничений ресурсов<sup>15</sup>. Дополни-

тельные подробности, относящиеся к математической структуре модели оптимизации центрифуг, можно найти в Приложении.

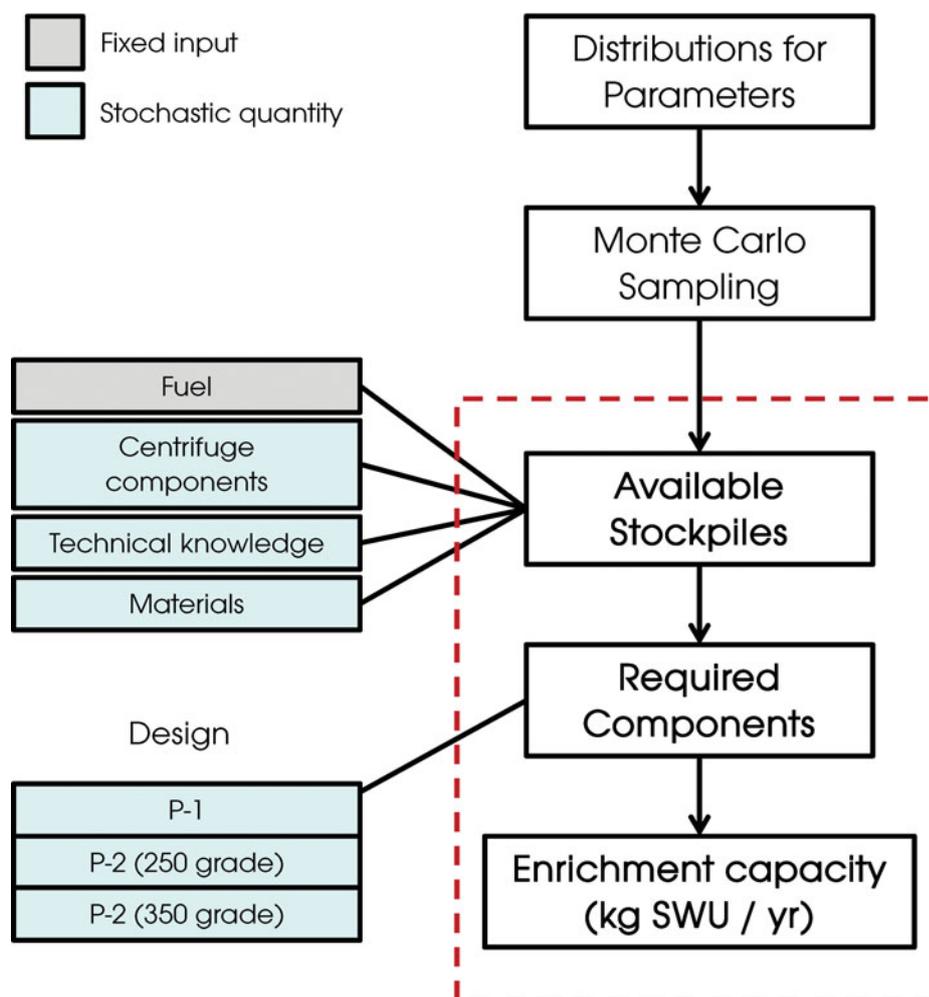


Рисунок 3. Схема модели оптимизации центрифуг. Надписи на рисунке (от левого верхнего угла против часовой стрелки): 1 – фиксированный входной параметр; 2 – стохастическая величина; 3 – топливо; 4 – компоненты центрифуг; 5 – технические знания; 6 – материалы; 7 – конструкция; 8 – P-2 (сорт 250); 9 – P-2 (сорт 350); 10 – производственная мощность обогащения (кг-ЕРР/год); 11 – требующиеся компоненты; 12 – доступные запасы; 13 – выборка по методу Монте-Карло; 14 – распределения для параметров.

Поскольку разделительные качества северокорейских центрифуг (то есть их производственная мощность обогащения урана) неопределенны, то их значения для трех конструкций центрифуг трактовались как случайные переменные. Модель связывает конструктивные параметры центрифуги (например, длину ротора) и свойства материала (например, предел прочности на разрыв) со скоростью ротора и максимальной работой разделения. В предположении линейного профиля теплового градиента работа разделения может быть рассчитана с помощью следующего уравнения<sup>16</sup>:

$$\delta U = \frac{V^2 Z}{33000} e_E \quad (1)$$

где  $\delta U$  – работа разделения (в кг-ЕРР/год),  $V$  – окружная скорость (в метрах в секунду),  $Z$  – длина ротора (в метрах) и  $e_E$  – безразмерная экспериментальная эффективность<sup>17</sup>.

Конструктивные параметры, влияющие на работу разделения каждого типа центрифуги (экспериментальная эффективность, окружная скорость) характеризуются как случайные переменные с треугольными распределениями, которые затем используются в качестве входных параметров в модели Монте-Карло. Моды этих распределений получены из оценок эффективности, предоставленных северными корейцами<sup>18</sup>, а верхний и нижний пределы оцениваются на основании различных конструкций центрифуг<sup>19</sup>. Эти треугольные рас-

пределения представлены в таблице 2.

Таблица 2. Конструктивные параметры, влияющие на разделительную способность каждого из трех типов центрифуг.

Проектный параметр	Центрифуга	Нижний предел	Мода	Верхний предел
Экспериментальная эффективность	P-1	8,0%	14,5%	32,0%
	P-2 (сорт 250)	20,0%	40,0%	57,0%
	P-2 (сорт 350)	25,0%	60,0%	77,0%
Окружная скорость (м/с)	P-1	320	333	362
	P-2 (сорт 250)	370	390	450
	P-2 (сорт 350)	460	480	520

### Модель байесовской сети

Для того, чтобы получить вероятностные распределения количеств материалов и компонентов, в программной системе Netica™ была построена байесовская сеть для представления зависимостей и соотношений между случайными переменными модели. Как отмечалось ранее, для того, чтобы получить распределения, требующиеся в качестве входных параметров детерминированной модели оптимизации, было использовано ограниченное число экспертных заключений в связи с вероятностными моделями. Байесовские сети, в дополнение к базовым распределениям, позволяют включать в вероятностную модель новую информацию, обновляя распределения доступных количеств компонентов центрифуг.

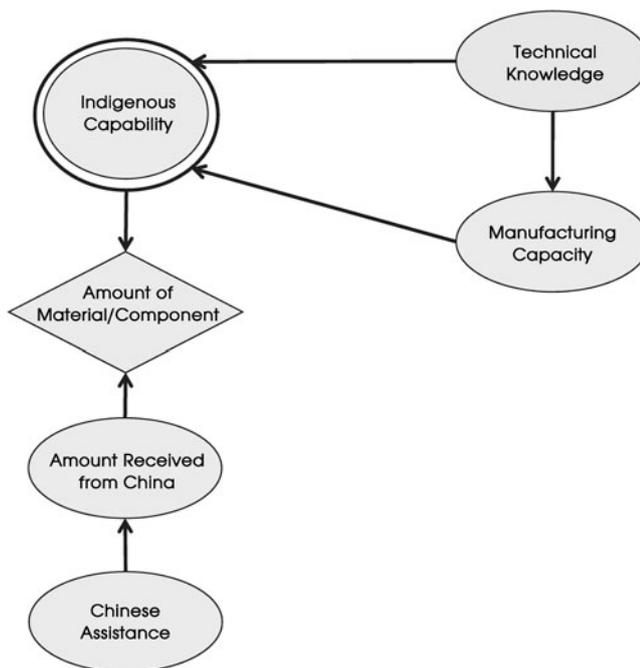


Рисунок 4. Диаграмма влияния, представляющая (неопределенные) количества материалов и компонентов, предоставляемые из внутренних источников, или с помощью Китая. Надписи на рисунке (от левого нижнего угла по часовой стрелке): 1 – китайская помощь; 2 – количество, поступившее из Китая; 3 – количество материала или компонента; 4 – внутренние источники; 5 – технические знания; 6 – производственные возможности.

На рисунке 4 представлена диаграмма влияния, являющаяся частью общей байесовской сети. Она показывает, что Северная Корея может получать относящиеся к центрифугам материалы и компоненты двумя способами. Первый способ – это изготовление компонентов центрифуги в своей стране (местная способность), а второй способ – это приобретение компонентов и материалов в глобальной сети поставок. В качестве

ве примера эта диаграмма влияния включает (неопределенные) количества материалов и компонентов, поступающих в Северную Корею из Китая. Модель включает в качестве потенциальных поставщиков Европу, Россию, Китай, Иран и Пакистан. Китай является основным предметом анализа помощи и чувствительности обнаружения, поскольку в настоящее время вероятность импорта из других стран существенно уменьшилась, в то время как Китай все еще представляет реальный потенциальный путь снабжения. Следует отметить, что этот путь не представляет собой официальные китайские правительственные каналы, а относится к быстро растущему китайскому промышленному сектору.

Вероятностная модель показывает, что для того, чтобы обладать внутренними возможностями для производства компонента центрифуги, что Северная Корея должна будет иметь как *технические знания*<sup>20</sup>, так и *производственные возможности*<sup>21</sup>. Как только Северная Корея получит свои собственные местные возможности для изготовления достаточного количества компонента, то этот конкретный компонент не будет ограничивать ее возможность изготавливать центрифуги. Если Северная Корея не сможет изготавливать конкретный компонент, то она должна будет приобрести его через свою закупочную сеть. Поэтому ей сначала надо будет получить помощь от другой страны<sup>22</sup>. После того, как она получит такую помощь, модель будет включать оценку количества компонентов или материалов, которые Северная Корея получит от другой страны.

Консультации с Хекером и Брауном позволили получить их заключения по количествам компонентов и материалов, которые Северная Корея могла бы получить из различных источников. Они предоставили 10-ые и 90-ые процентилю кумулятивных функций распределения (КФР), представляющие их мнения. Затем эти оценки были подогнаны к гамма-распределению<sup>23</sup>, и такое распределение было включено в байесовскую сеть. Аналогичные гамма-распределения были запрограммированы для всех компонентов и материалов, и для всех возможных стран происхождения. В настоящее время в качестве потенциальных областей происхождения учитываются только пять регионов (предполагается, что каждая компонента имеет только одну возможную область происхождения): Европа, Россия, Китай, Иран и Пакистан. Тем не менее, к модели можно легко добавить другие страны, а различные материалы и компоненты могут иметь различное происхождение.

Между узлами помощи для мартенситно-старееющей стали и высокопрочных алюминиевых сплавов были включены зависимости. Таким образом, вероятностная модель включает в себя тот факт, что знание о помощи одной страны в поставках высокопрочных алюминиевых сплавов влияет на вероятность того, что та же страна также оказывает помощь в приобретении мартенситно-старееющей стали. Точно так же, были включены зависимости между узлами технических знаний, касающихся мартенситно-старееющей стали и самоустанавливающихся подшипников, отражая ту идею, что информация о технических знаниях Северной Кореи в производстве мартенситно-старееющей стали влияет на вероятность того, что она обладает техническими знаниями в производстве самоустанавливающихся подшипников. В вероятностную модель могут быть включены и другие зависимости, но требования к памяти компьютера заметно возрастают при добавлении зависимостей. Еще более критичным может быть то, что большое количество зависимостей радикально усложняет процесс выработки экспертных заключений.

В дополнение к таким зависимостям, была разработана вероятностная суб-модель обнаружения, так же, как и диаграмма влияния в системе Netica<sup>TM</sup>. Данная суб-модель может обновлять распределения, если в будущем международное сообщество обнаружит конкретные случаи контрабанды относящихся к центрифугам материалов и компонентов. На рисунке 5 показана байесовская сеть, используемая для определения количества конкретного компонента, импортируемого из одной страны с учетом одного, или более, обнаружений. Суб-модель обнаружения обсуждается в Приложении.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Данная модель выдает иллюстративные оценки вероятностного распределения производственных мощностей Северной Кореи по обогащению урана. Следует еще раз отметить, что акцент здесь делается на описание и иллюстрацию анализа, а не на численные результаты, которые, вероятно, будут изменяться по мере появления дополнительных экспертных оценок или новой доступной информации. Представленные здесь результаты основаны на ограниченном числе экспертных заключений, полученных в конце 2014 года, в дополнение к оценкам, найденным в открытой литературе. Во всех случаях проводилось 10 000 циклов моделирования по методу Монте-Карло и предполагалось, что не было никаких дополнительных обнаружений, если только не было указано иное. Поэтому представленные здесь результаты являются только иллюстративными, поскольку другие факторы и дополнительная информация (например, заключения других экспертов, разведывательная информация из различных источников, и т.д.) были для нас недоступными, но они могут быть включены в дальнейшем.

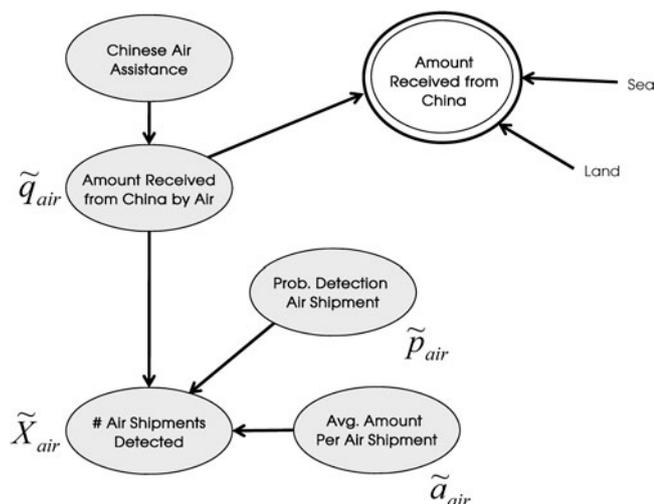


Рисунок 5. Суб-модель обнаружения: байесовская сеть. Надписи на рисунке (от левого верхнего угла против часовой стрелки): 1 – китайская воздушная помощь; 2 – количество, поступившее из Китая по воздуху; 3 – количество обнаруженных поставок по воздуху; 4 – среднее количество на одну воздушную поставку; 5 – вероятность обнаружения воздушной поставки; 6 – количество, полученное из Китая; 7 – по суше; 8 – по морю.

### Результаты базового варианта

Как показано на рисунке 6, полученное распределение производственной мощности обогащения в момент проведения исследования может быть представлено функцией плотности вероятности (ФПВ) с положительным коэффициентом асимметрии, конечной вероятностью нулевого значения и главной модой, приблизительно равной 35 000 кг-ЕРР/год<sup>24</sup>. Это значение будет соответствовать ежегодному изготовлению 4 – 6 бомб, или производственной мощности обогащения, достаточной для снабжения производства электроэнергии на примерно пяти реакторах с обычной водой с электрической мощностью 25 – 30 МВт(эл.), аналогичных строящемуся в настоящее время<sup>25</sup>.

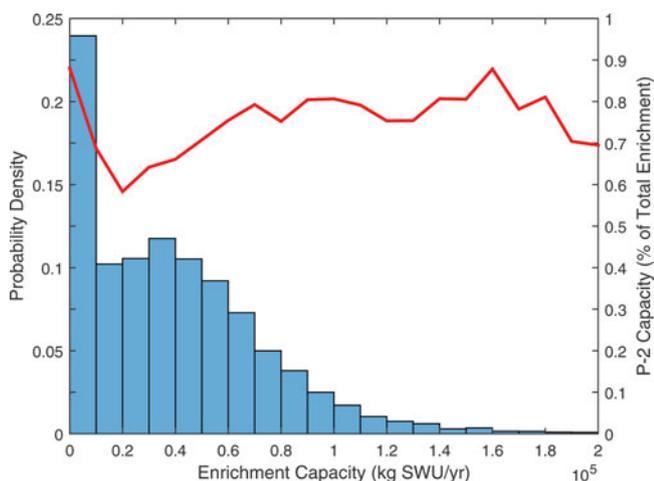


Рисунок 6. Иллюстрация распределения производственной мощности обогащения (гистограмма) и доли центрифуг P-2 в общей производственной мощности (линия). По горизонтальной оси отложена мощность обогащения (в  $10^5$  кг-ЕРР/год). На левой вертикальной оси показана плотность вероятности, а на правой – доля центрифуг P-2 в общей мощности обогащения.

Полученный результат (то есть иллюстративные значения случайной переменной производственных мощностей обогащения в 2014 году) может также быть представлен кумулятивной функцией распределения (КФР). Как представлено на рисунке 7, график КФР показывает вероятность того, что производственные мощ-

ности Северной Кореи по обогащению урана на действующих установках с центрифугами (или тех, которые станут эксплуатироваться в течение ближайшего года) будут меньше, или равны значению, отложенному на оси x. Этот график, основанный на экспортном рассмотрении дезагрегированных оценок, показывает, что вероятность близкой к нулю мощности обогащения урана, примерно равна 14 процентам. Хекер независимо оценил вероятность такого сценария "Потемкинской деревни" (то есть того, что показанные ему центрифуги и пульт управления были макетами) менее, чем в пять процентов<sup>26</sup>. В данной модели такие сценарии с нулевой мощностью появляются тогда, когда северные корейцы не могут произвести или приобрести либо кольцевые магниты, либо специальные масла, которые необходимы для эксплуатации центрифуг. Этот график показывает также, что вероятность того, что полные производственные мощности превышают величину в 8 000 кг-ЕРР/год, объявленную для установки, показанной Хекеру, с вероятностью в 81 процент<sup>27</sup>.

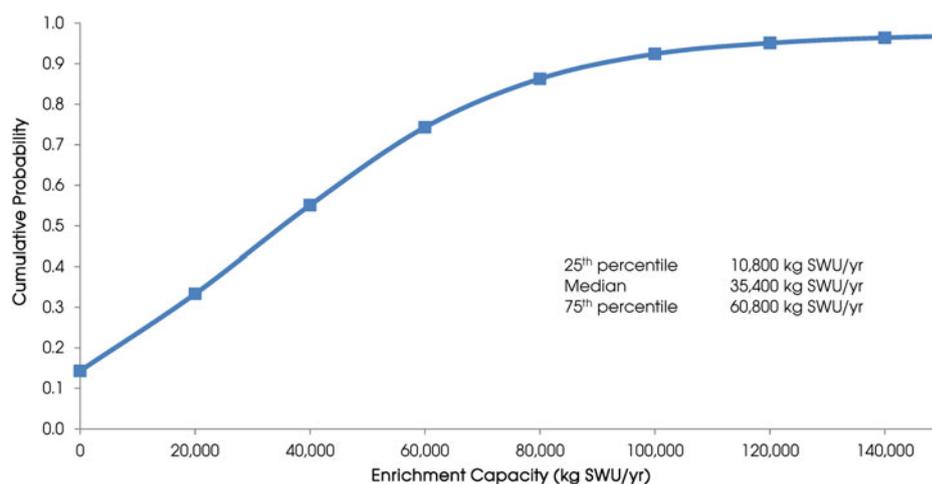


Рисунок 7. Кумулятивная функция распределения производственной мощности обогащения урана в Северной Корее, которая показывает вероятность того, что мощности меньше, или равны величине на оси x. По горизонтальной оси отложена мощность обогащения (в кг-ЕРР/год). На вертикальной оси показано значение кумулятивной вероятности. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 – 25-ый процентиль – 10 800 кг-ЕРР/год; 2 – медиана – 35 400 кг-ЕРР/год; 3 – 75-ый процентиль – 60 800 кг-ЕРР/год.

Проверка того, какое ограничение запасов компонентов является сдерживающим для конкретного сценария (то есть, сценария, соответствующего конкретному прогону программы Монте-Карло) позволяет выявить компоненты, которые являются узкими местами для расширения производства обогащенного урана. Как отмечалось ранее, эти расчеты базируются на текущих экспертных оценках и они должны обновляться по мере того, как становится доступной новая информация. Для моделирования по методу Монте-Карло с 10 000 циклов, процентную долю циклов, для которых ограничение является сдерживающим, можно рассматривать как вероятность того, что каждый запас будет ограничивающим фактором для минимального расширения программы. Рисунок 8 позволяет предположить, что наиболее вероятными узкими местами будут самоустанавливающиеся подшипники (с вероятностью сдерживающего ограничения, равной 0,36), мартенситно-стареющая сталь и высокопрочные алюминиевые сплавы. С другой стороны, весьма маловероятно, что сдерживающим ограничением станут блоки контроллеров, учитывая легкость получения таких блоков и сравнительно малое количество таких блоков, требующихся для установок с центрифугами.

Другим интересным результатом является количество центрифуг, которые может изготавливать Северная Корея с учетом ее запасов компонентов и сырьевых материалов. Центрифуга Р-2, благодаря ее окружной скорости и длине, обладает значительно большей производительностью по сравнению с центрифугой Р-1. Поэтому в модели предполагается, что Северная Корея будет производить так много центрифуг Р-2, сколько это возможно с учетом доступной мартенситно-стареющей стали. Если запасы алюминиевых сплавов являются сдерживающим ограничением (то есть, если имеется достаточная поставка мартенситно-стареющей стали), то будут изготавливаться только центрифуги Р-2. мартенситно-стареющей стали. Если сдерживающим ограничением являются запасы мартенситно-стареющей стали, то обычно из избыточных алюминиевых сплавов будет изготавливаться больше центрифуг Р-1. Оптимальное центрифужное производство большей частью использует обогащение на центрифугах Р-2, как это указано на рисунке 6. Этот результат, однако, зависит от вероятностей внутреннего производства, приведенных в таблице А3. Эти величины в высшей степени неопределенны, и поэтому будущая работа должна быть систематически направлена на чувствитель-

ность этих результатов к возможностям производства и их корреляциям.

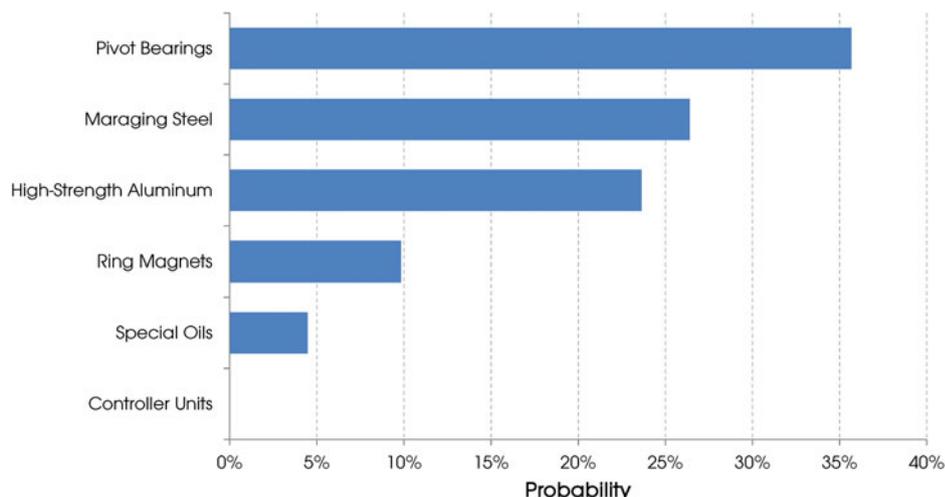


Рисунок 8. Вероятность того, что доступность каждого из запасов является сдерживающим ограничением. По горизонтальной оси отложена вероятность (в процентах). Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 – самоустанавливающиеся подшипники; 2 – мартенситно-старееющая сталь; 3 – высокопрочные алюминиевые сплавы; 4 – кольцевые магниты; 5 – специальные масла; 6 – блоки контроллеров.

#### Анализ чувствительности

После выявления потенциальных узких мест в запасах следующей проблемой станет определение чувствительности выходных данных к размерам запасов. Анализ чувствительности к размерам запасов выполняется поочередным удалением сдерживающих ограничений, начиная с наиболее часто встречающегося, и перерасчетом распределения производственных мощностей обогащения. Эти результаты иллюстрируют чувствительность модели, но они также показывают потенциал Северной Кореи к увеличению обогащения урана, если она смогут получить дополнительные компоненты.

На рисунке 9 показано, как изменяется кумулятивная функция распределения производственных мощностей обогащения Северной Кореи по мере смягчения сдерживающих ограничений. После удаления ограничения на самоустанавливающиеся подшипники (то есть наиболее часто встречающегося сдерживающего ограничения), медиана распределения производственной мощности увеличится с 35 400 до 43 300 кг-ЕРР/год<sup>28</sup>. После снятия ограничений на доступность всех материалов медиана увеличится до более 170 000 кг-ЕРР/год. Вследствие этого, если Северная Корея сможет получить достаточное количество мартенситно-старееющей стали, высокопрочных алюминиевых сплавов, и способность производства самоустанавливающихся подшипников, то она сможет значительно нарастить свои производственные мощности обогащения урана, возможно, на другой площадке<sup>29</sup>.

#### Зависимые вероятности для экспортеров

В базовом варианте предполагается, что вероятность, с которой каждая конкретная страна будет экспортировать ядерные материалы в Северную Корею, не зависит от типа материалов. В этом подразделе данное предположение ослабляется для экспорта мартенситно-старееющей стали и высокопрочных алюминиевых сплавов экспорта, чтобы более точно отразить представления экспертов в отношении тенденций стран игнорировать ограничения на экспорт, если они будут полагать, что другие тоже "обманывают", и потому, что представленные ранее в этом разделе результаты показывают, что производственная мощность обогащения в Северной Кореи чувствительна к запасам этих материалов. Смягчение предположения о независимости экспортеров требует, чтобы эксперты оценили вероятность того, что вторая страна экспортирует ядерные материалы в Северную Корею, при условии, что первая страна делает, или не делает это, и что третья страна экспортирует ядерные материалы, при условии, что первая и вторая страны делают это, или ни одна из них не делает этого, или первая страна делает это, а вторая нет, или вторая страна делает это, а первая нет, и так далее. Порядок оценки не играет роли, если проведены оценки всех возможных комбинаций пяти потенциальных стран-экспортеров. Для обоих материалов эксперты выбрали следующий порядок оценки: сна-

чала оценить вероятность того, что экспортируют Европа или Япония, затем оценить роль Пакистана (при условии, что Европа или Япония экспортируют, или нет), затем роль России (при условии, что другие делают это), затем роль Ирана, и, наконец, роль Китая.

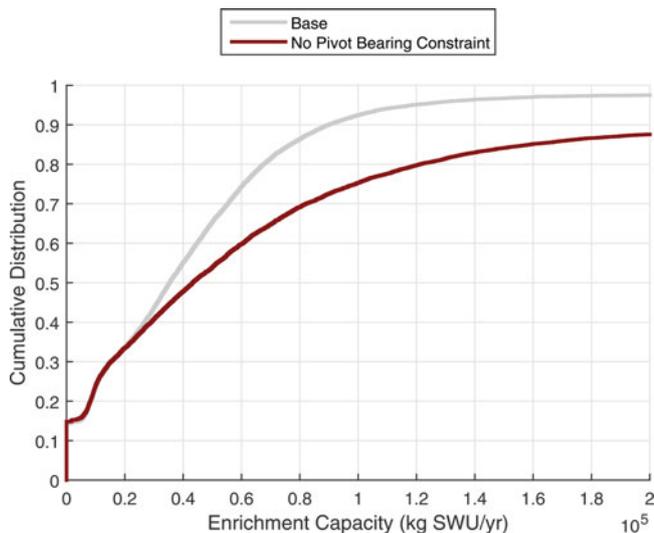


Рисунок 9. Кумулятивное распределение мощности обогащения с отмененными сдерживающими ограничениями. По горизонтальной оси отложена мощность обогащения (в  $10^5$  кг-ЕРР/год). На вертикальной оси показано значение кумулятивной вероятности. Надписи над рисунком (сверху вниз): 1 – базовый вариант; 2 – отсутствие ограничения на самоустанавливающиеся подшипники.

Влияние рассмотрения зависимостей между потенциальными ядерными экспортерами Северной Кореи заключается в увеличении как среднего значения, так и дисперсии вероятности производственных мощностей Северной Кореи по обогащению. В то время как в базовом варианте вероятность того, что производственная мощность обогащения превышает 8 000 кг-ЕРР/год (мощность, заявленная Северной Кореей), равна 81 проценту, а медиана распределения мощности обогащения равна 35 400 кг-ЕРР/год, те же самые показатели для варианта с зависимыми вероятностями экспортеров равны соответственно 86 процентам и 52 200 кг-ЕРР/год, как показано на рисунке 10. Интуитивное объяснение этих изменений состоит в том, что эксперты считают, что весьма вероятно, что конкретные страны в прошлом экспортировали ядерные материалы в Северную Корею, и это явление, в свою очередь, несколько увеличивает вероятность того, что другие страны также экспортировали в Северную Корею (хотя и не обязательно через границу).

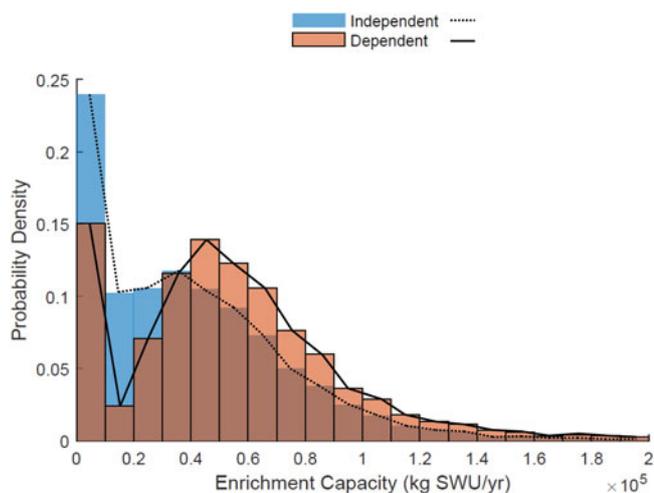


Рисунок 10. Сравнение функций плотности вероятности производственных мощностей обогащения урана Северной Кореи с независимыми и с зависимыми экспортерами. По горизонтальной оси отложена мощность обогащения (в  $10^5$  кг-ЕРР/год). На вертикальной оси показано значение плотности вероятности. Надписи над рисунком (сверху вниз): 1 – независимые; 2 – зависимые.

Другими словами, в то время как для варианта с независимостью экспортера получается, что Северная Корея, скорее всего, в состоянии обогатить достаточно урана для изготовления до шести бомб в год (мода распределения), ослабление этой независимости увеличивает наиболее вероятное обогащение Северной Кореей количества урана, достаточного до девяти бомб в год. Большое количество ВОУ позволит Северной Корее более быстро наращивать свой ядерный арсенал и придаст ей большую гибкость в проведении ядерных испытаний. Северной Корее, скорее всего, понадобится проводить больше ядерных испытаний для миниатюризации своих устройств для того, чтобы установить их на одной из своих ракет. Тем не менее, испытания скорее всего, будут сильнее ограничиваться политическими силами, чем отсутствием расщепляющихся материалов, если мощности обогащения будут соответствовать любой из оценок. Представленная модель может быть расширена для того, чтобы включить набор зависимостей между импортом критических элементов для всей северокорейской ядерной программы. Такое расширение будет зависеть не от структуры модели, а от возможностей компьютера и способности запрограммировать заключения экспертов (рисунок 11).

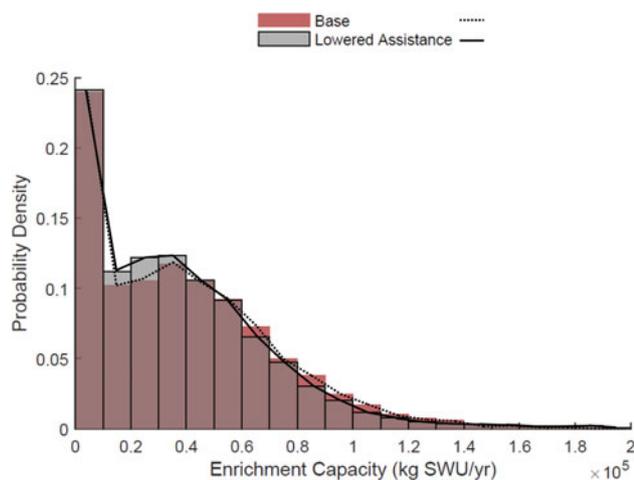


Рисунок 11. Сравнение функций плотности вероятности производственных мощностей обогащения урана Северной Кореи в базовом варианте и в сценарии с уменьшенной помощью Китая. По горизонтальной оси отложена мощность обогащения (в  $10^5$  кг-ЕРР/год). На вертикальной оси показано значение плотности вероятности. Надписи над рисунком (сверху вниз): 1 – базовый вариант; 2 – уменьшенная помощь.

### Анализ сценариев

Базовая модель может быть расширена для того, чтобы исследовать влияние разнообразного набора гипотетических сценариев. За анализом сценариев стоит двоякая мотивация. Во-первых, они показывают влияние изменения помощи, которую Северная Корея может получать от международных сторон. Во-вторых, они демонстрируют гибкость модели, и, в особенности, показывают, как использование байесовских сетей позволяет вводить новую разведывательную информацию, относящуюся к поставкам компонентов и материалов для центрифуг (если предполагать, что функции правдоподобия остаются постоянными). Здесь три сценария привлекаются для того, чтобы иллюстрировать способы адаптации модели к отражению изменений в политике или в обнаружении поставок.

### Помощь

В первом сценарии исследуется влияние уменьшения вероятности сотрудничества между Северной Кореей и Китаем для всех компонентов и материалов. В этом анализе чувствительности вероятность китайской помощи снижается до 0,5 для того, чтобы определить ее влияние на распределение вероятностей способности Северной Кореи обогащать уран. Обратите внимание, что эта вероятность помощи не имеет прямого воздействия на межправительственные отношения, а характеризует шансы на то, что китайские компании могут служить в качестве пункта отправления для пересылки компонентов или материалов.

Меньшие вероятности китайской помощи приводят к понижению вероятности в правой части распределения мощностей по обогащению по сравнению с базовым вариантом. Тем не менее, модель и заключения в таблице A2 показывают, что экспортные стороны в других странах могут вносить вклад в запасы оборудования и материалов для центрифуг даже тогда, когда вероятность китайской помощи будет меньше, и несмотря на то, что последние санкции Совета Безопасности Организации Объединенных Наций, вероятно, ограничат

импорт из других стран. Как и другие результаты, эти идеи связаны с оцениваемыми значениями приобретения компонентов и материалов для стран происхождения в таблице A2, и обновленные разведывательные оценки этих величин могут приводить к различным качественным выводам.

Второй сценарий помощи показывает то, что могло бы случиться с северокорейской программой по центрифугам, если один из компонентов или материалов станет гораздо менее доступным. В этом примере вероятность помощи для блоков контроллеров сводится к моделированию помещения этих компонентов в списки двойного назначения, поскольку отсутствие мониторинга экспортного контроля для этого компонента вносит свой вклад в то, что он никогда не являлся сдерживающим ограничением. Для проверки влияния этой гипотезы вероятность получения блоков контроллеров из Китая, Европы или России была понижена с 0,95 до 0,05, и из Ирана и Пакистана с 0,95 до 0,50. Вероятности помощи из этих регионов для всех остальных компонентов были оставлены без изменений. Функция плотности вероятности для производственных мощностей по обогащению урана в Северной Корее изменилась очень мало, что отражает мнения экспертов о том, что блоки контроллеров можно будет легко получить из многих источников. Этот анализ поддерживает мнение о том, что хотя экспортный контроль и необходим, он обычно не может остановить целенаправленного нарушителя.

### **Обнаружение**

Для иллюстрации субмодели обнаружения передачи компонентов здесь был рассмотрен гипотетический сценарий, показывающий изменение распределения вероятности для мощности обогащения в том случае, если будет определено обнаружена транспортировка по морю из Китая высокопрочных алюминиевых сплавов. На рисунке 12 показана субмодель для количества алюминия, приобретенного у китайских источников. До обнаружения морских перевозок первоначальное распределение алюминиевых сплавов китайского происхождения соответствовало вероятности в 0,58 того, что любая перевозка любого типа алюминиевых сплавов останется незамеченной, вероятности в 0,20 для обнаружения одной перевозки, и очень малым шансам для обнаружения более, чем одной перевозки.

На рисунке 12 показаны обновленные распределения вероятности в байесовской сети системы Netica™, полученные в предположении того, что были обнаружены четыре морские поставки алюминиевых сплавов из Китая. Отметим, что во всех распределениях, кроме количества алюминиевых сплавов китайского происхождения, ничего не изменилось. Однако, распределение кроме количества алюминиевых сплавов, полученного из Китая, изменилось и его ожидаемое значение увеличилось на 400 тонн. Это новое изменение было проведено через модель оптимизации для того, чтобы иллюстрировать влияние такого обновления на распределение производственных мощностей обогащения урана в Северной Корее, как это показано на рисунке 13.

Распределение сместилось вправо, что указывает на увеличение вероятности более высоких мощностей обогащения. Этот результат имеет смысл в контексте модели, учитывающей поставки алюминиевых сплавов в качестве сдерживающего ограничения. Данный сценарий показывает, как обнаружения поставок могут оказать существенное влияние на распределение вероятности для мощности обогащения. Прямое или косвенное обнаружение является одним из основных методов, применяемых международным сообществом для сбора информации о центрифужной программе Северной Кореи. Поэтому способность использовать обнаружения для обновления распределений доступных Северной Корее количеств компонентов или материалов особенно важно для политических деятелей и аналитиков.

### **ВЫВОДЫ**

Анализ, подробно описанный выше, предлагает систематический подход к вероятностной оценке размеров программы обогащения урана в Северной Корее и выявляет потенциальные узкие места в расширении производства. Основными случайными входными параметрами являются запасы материалов и компонентов, доступные для изготовления центрифуг (но которые могут быть ограничивающими факторами для него). Для оценки размеров программы обогащения урана в Северной Корее в зависимости от неопределенной доступности компонентов используется детерминированная модель оптимизации. Для генерации распределений вероятности размеров запасов компонентов, доступных для использования в изготовлении центрифуг для разделения изотопов урана, применяются байесовские сети. Моделирование по методу Монте-Карло используется для распространения неопределенностей в запасах компонентов для центрифуг через детерминированную модель и для построения соответствующего распределения мощности обогащения урана. Все представленные здесь величины являются иллюстративными и опираются на ограниченные экспертные заключения, сделанные в 2014 году. Об ядерной программе Северной Кореи известно очень мало. Поэтому эти величины следует рассматривать как правдоподобные оценки текущих возможностей Северной Кореи, основан-

ные на *открытых источниках*. Однако, для поддержки принятия решений эти значения должны быть обновлены соответствующими организациями, применяющими наилучшую доступную информацию, которая может включать и засекреченные оценки.

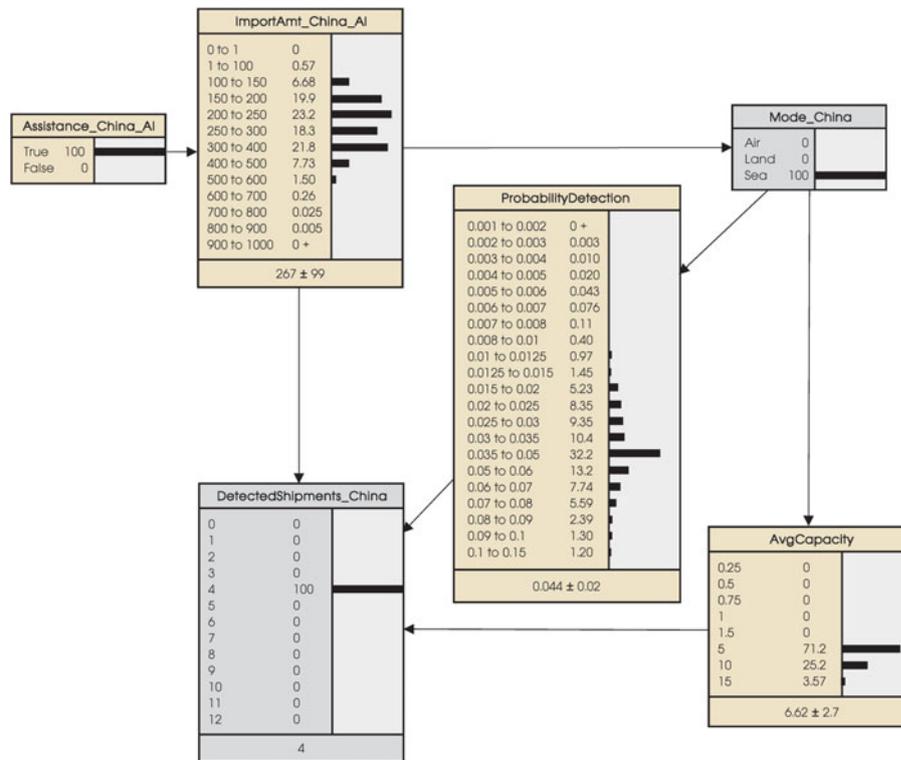


Рисунок 12. Обновленная байесовская сеть в системе Netica™, показывающая субмодель сценария обнаружения морских поставок из Китая. В блоках на рисунке указаны названия переменных субмодели (сверху вниз): 1 – импорт алюминия из Китая; 2 – вид поставок из Китая (по воздуху, по земле, по морю); 3 – помощь Китая (истинно, ложно); 4 – вероятность обнаружения; 5 – обнаруженные поставки из Китая; 5 – средние мощности.

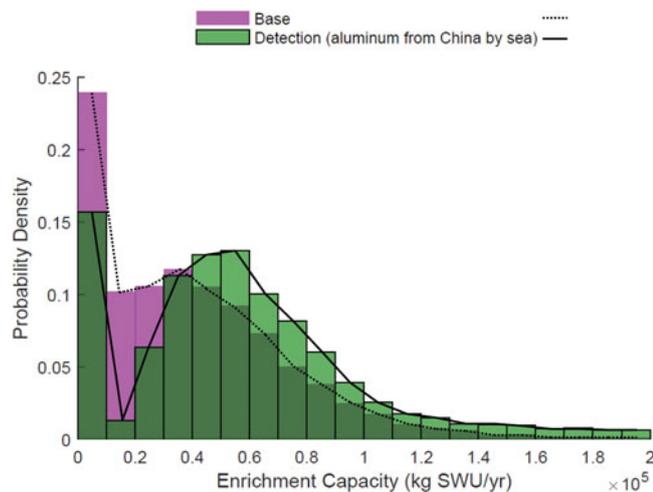


Рисунок 13. Сравнение функций плотности вероятности производственных мощностей обогащения урана в Северной Корее в базовом варианте и в сценарии с обнаружением (то есть, сценарии, в котором были обнаружены четыре поставки алюминиевых сплавов из Китая). По горизонтальной оси отложена мощность обогащения (в 10<sup>5</sup> кг.ЕРР/год). На вертикальной оси показано значение плотности вероятности. Надписи над рисунком (сверху вниз): 1 – базовый вариант; 2 – обнаружение (морские перевозки алюминиевых сплавов из Китая).

Настоящий анализ, основанный на экспертных оценках о потенциальном приобретении материалов и компонентов в качестве входных параметров, поддерживает интуитивный вывод одного из авторов (Хекера) о том, что у Северной Кореи имеется способность обогащения, большая, чем 8 000 кг-ЕРР/год, которая была заявлена ею в 2010 году. Анализ показывает, что вероятность того, что установка в Йонбене имеет мощность обогащения, большую или равную 8 000 кг-ЕРР/год, составляет примерно 80 процентов. Распределения вероятности для этой мощности показывают, что нельзя игнорировать возможность того, что Северная Корея обладает мощностью обогащения в несколько десятков тысяч кг-ЕРР/год. Результаты демонстрируют также, что нельзя сбрасывать со счета тот факт, что мощности Северной Кореи могут быть нулевыми (или близкими к нулю), хотя недавняя активность на установке по производству топлива (и недавние дополнительные данные, не приведенные здесь) делает такой вывод еще менее вероятным, чем позволяют предположить иллюстративные результаты этой модели.

Тремя наиболее вероятными узкими местами при повышении производственных мощностей являются доступность самоустанавливающихся подшипников (с вероятностью сдерживающего ограничения, равной 0,36), мартенситно-стареющая сталь и высокопрочные алюминиевые сплавы. Анализ чувствительности к запасам показал, что если северные корейцы смогут получить достаточное количество высокопрочных алюминиевых сплавов или мартенситно-стареющей стали и возможность изготовления самоустанавливающихся подшипников, то они смогут значительно расширить производство.

Обилие мартенситно-стареющей стали позволит значительно увеличить мощности по обогащению с центрифугами Р-2, но если станет доступным неограниченное количество высокопрочных алюминиевых сплавов, то обширное производство центрифуг Р-1 также может привести к высоким производственным мощностям обогащения. Хотя точная величина этого увеличения зависит от исходных распределений, модель позволяет с легкостью провести такой анализ. Дальнейшая работа должна также будет включать вариант, в котором Северная Корея получит возможность собственного производства мартенситно-стареющей стали сорта 250 (с вероятностью > 0,2 согласно таблице А3) и решит применить ее на меньших скоростях вращения ротора. Эти особенности могут быть включены в модель посредством изменения вероятностей, представленных в таблицах А2 и А3, с соответствующим изменением результатов. Субмодель обнаружения предоставляет возможность включать новую разведывательную информацию о передаче компонентов в Северную Корею и обновлять распределения вероятности без необходимости в повторной оценке сигналов (здесь предполагается, что их качество постоянно идеально). Изученный здесь гипотетический сценарий показывает изменения в распределении мощностей обогащения при обнаружении морских поставок высокопрочных алюминиевых сплавов из Китая. В будущей работе можно будет включить более усложненную байесовскую модель для учета качества сигналов обнаружения, смягчая таким образом предположение об идеальности наблюдений.

Представленная здесь модель может поэтому оказаться наиболее полезной для лиц, принимающих политические и стратегические решения, относящиеся к способности Северной Кореи производить ядерное оружие. Однако, она потребует постоянного поддержания и обновления в реальном времени для отражения наилучшей доступной информации во время принятия таких решений.

## ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. D. Albright, and P. Brannan, "Taking Stock: North Korea's Uranium Enrichment Program," Institute for Science and International Security, 8 October 2010, <http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/ISIS DPRK UEP.pdf>.
2. S. Hecker, and R. Carlin, "North Korea in 2011: Countdown to Kim il-Sung's Centenary," *The Bulletin of Atomic Scientists* (January/February 2012).
3. D. Albright, and P. Brannan, "Taking Stock: North Korea's Uranium Enrichment Program" (ссылка 1).
4. S. Hecker, "A Return Trip to North Korea's Yongbyon Nuclear Complex," Center for International Security and Cooperation, Stanford University, November 2010, <http://iis-db.stanford.edu/pubs/23035/HeckerYongbyon.pdf>.
5. S. Hecker, "Interview with Siegfried Hecker: North Korea Complicates the Long-Term Picture," *The Bulletin of the Atomic Scientists* 5 (2013), <http://www.thebulletin.org/web-edition/features/interview-siegfried-hecker-north-korea-complicates-the-long-term-picture>.
6. Байесовская сеть (или диаграмма влияния) является компактным представлением классического дерева событий, в котором неопределенности представлены маргинальным распределением вероятностей некоторых случайных переменных, и условными распределениями зависимых переменных. Она позволяет рассчитать распределение результирующей переменной, так же, как и в случае гомоморфного дерева событий.

7. При моделировании по методу Монте-Карло производится выборка случайных величин из распределений каждого из входных параметров (то есть, величин запасов каждого из компонентов центрифуги). Каждый из таких наборов случайных величин определяет сценарий и становится входным параметром детерминированной модели оптимизации центрифуг. Для каждого такого сценария с помощью этой модели рассчитывается соответствующее максимальное значение производственной мощности обогащения (в кг-ЕРР/год), которое может быть получено с учетом доступности различных компонентов. Выборка и оптимизация повторяются для того, чтобы на основании доступной информации построить вероятностное распределение производственной мощности обогащения в Северной Корее в заданный момент времени.
8. D. Albright and M. Hibbs, "Iraq's Shop-Till-You Drop Nuclear Program," *The Bulletin of the Atomic Scientists* (1992).
9. Такие материалы, как мартенситно-стареющая сталь и алюминиевые сплавы, надо будет дополнительно обрабатывать после того, как они будут импортированы. Непонятно, обладает ли Северная Корея возможностью выполнения таких работ.
10. Мартенситно-стареющая сталь – это малоуглеродистый высокопрочный сплав железа, содержащий около 18 процентов никеля, так же как кобальт, молибден, титан, и другие малые легирующие добавки. Она обладает очень хорошей трещиностойкостью, хорошо сваривается и легко поддается термообработке для достижения очень высокой прочности. Сорты 250 и 350 соответствуют пределу текучести в тысячах фунтов на квадратный дюйм (соответственно 176 и 247 кГ/мм<sup>2</sup>).
11. Доступность магнитов из ферритов бария или самария в странах, подобных Китаю, также может быть очень высокой. В 2011 году Иран разместил заказ на 100 000 таких магнитов для своих центрифуг Р-1 в китайской компании (хотя неизвестно, был ли этот заказ принят), как отмечается в статье David Albright, "Ring Magnets for IR-1 Centrifuges," Institute for Science and International Security, 13 February 2013, [http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/iran\\_ring\\_magnet\\_13Feb2013.pdf](http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/iran_ring_magnet_13Feb2013.pdf).
12. M. Granger Morgan, and M. Henrion, *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis* (Cambridge: Cambridge University Press, 1990).
13. D. Albright, and C. Walrond, "North Korea's Estimated Stocks of Plutonium and Weapon-Grade Uranium," Institute for Science and International Security, 16 August 2012, [http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/dprk\\_fissile\\_material\\_production\\_16Aug2012.pdf](http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/dprk_fissile_material_production_16Aug2012.pdf).
14. Отметим, что эти иллюстративные оценки производственных мощностей обогащения не обязательно будут лучшими, поскольку модель в данной статье требует много оценок параметров с ограниченным количеством информации из открытых источников и опирается на заключения немногих экспертов.
15. Скрытая цена каждого ограничения определяется как увеличение производственных мощностей по обогащению, которое могло бы получиться в результате уменьшения на одну единицу сдерживающего ограничения для каждого элемента.
16. R. S. Kemp, "Gas Centrifuge Theory and Development: A Review of U.S. Programs," *Science and Global Security* 17 (2009): 1–19.
17. Экспериментальная эффективность включает в себя неэффективности, количественно не определенные в уравнении, такие, как возмущения противотока или турбулентное перемешивание. Эта эффективность уникальна для каждой конструкции центрифуги, и она улучшается по мере накопления опыта в производстве центрифуг.
18. S. Hecker, "A Return Trip to North Korea's Yongbyon Nuclear Complex" (ссылка 4).
19. R. S. Kemp, "Gas Centrifuge Theory and Development: A Review of U.S. Programs" (ссылка 16).
20. *Техническое знание* – это двоичная случайная переменная, которая указывает, имеет ли Северная Корея технические познания для изготовления конкретного компонента, или нет.
21. *Производственная возможность* – это двоичная случайная переменная, которая указывает, имеет ли Северная Корея необходимое оборудование для изготовления конкретного компонента, или нет.
22. *Помощь* – это двоичная случайная переменная, которая указывает, была ли конкретная страна или регион местом происхождения типа компонента или материала, и не обязательно указывает на межправительственные связи между такой страной и Северной Кореей.
23. Для подгонки к экспертным заключениям было выбрано гамма-распределение, поскольку его общая форма обладает особенностями, отражающими мнение экспертов. Его плотность равна нулю при нулевом значении переменной, плотность сосредоточена в области меньших значений, но длинный хвост распределения простирается до бесконечности. Примеры аппроксимации экспертных оценок гамма-распределениями могут быть найдены в Приложении.
24. В качестве меры центрального поведения распределений мощности обогащения в данном анализе обычно используется "мода". Среднее значение в данном контексте менее характерно из-за большого

- влияния на его величину выборок с малой вероятностью и большим значением. Тем не менее, хвост распределения, который сильно влияет на среднее значение, важен, поскольку он представляет ситуации с малой вероятностью и серьезными последствиями, которые могут рассматриваться при принятии политических решений. Мода – это значение, которое соответствует максимуму распределения вероятности. Она представляет величину мощности обогащения, которая чаще всего выбирается из дискретного распределения, показанного на рисунке 6.
25. Эти аппроксимации основаны на программе калькулятора обогащения урана, который можно найти на сайте <http://www.wise-uranium.org/nfcue.html>.
  26. Хекер изменил свою оценку до менее одного или двух процентов из-за значительного объема строительства, которое наблюдается теперь на спутниковых снимках на предприятии изготовления топлива, которое, как он считает, поддерживает программу обогащения. Кроме того, внешнее строительство экспериментального реактора на обычной воде выглядит как законченное в конце 2013 года, и этот реактор будет введен в строй где-то в 2015 году. Ему потребуется топливо с НОУ, которое, вероятно, будет производиться внутри страны. Оценки Хекера демонстрируют важность посещения площадки и наблюдений, поскольку северокорейская ядерная программа исторически недооценивалась при использовании косвенной информации и оценок.
  27. S. Hecker, “A Return Trip to North Korea’s Yongbyon Nuclear Complex” (ссылка 4).
  28. Снятие этого ограничения эквивалентно предположению, что Северная Корея получает внутреннюю возможность изготовления самоустанавливающихся подшипников с вероятностью, равной единице.
  29. Хотя точная величина этого увеличения зависит от входных распределений, этот анализ может быть довольно легко выполнен в данной схеме моделирования.
  30. Matthias Englert, личное интервью от 18 апреля 2011 года. R. Scott Kemp, личное интервью от 26 сентября 2013 года.
  31. D. Albright and C. Walrond, “Iran’s Gas Centrifuge Program: Taking Stock,” Institute for Science and International Security, 11 February 2010, [http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/Natanz\\_Operation\\_11Feb2010.pdf](http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/Natanz_Operation_11Feb2010.pdf); D. Albright, and P. Brannan, “Taking Stock: North Korea’s Uranium Enrichment Program.”
  32. *Количество, полученное конкретным способом транспортировки* – это непрерывная случайная величина, которая представляет полное количество компонента по всем поставкам в Северную Корею из страны происхождения, направленных по воздуху, или по морю, или по суше.
  33. *Вероятность обнаружения* – это непрерывная случайная величина, которая представляет вероятность обнаружения любой данной поставки материала или компонента.
  34. *Среднее количество в поставке* – это непрерывная случайная величина, которая представляет среднее количество компонентов или материалов на борту в поставке в Северную Корею.
  35. *Количество обнаруженных поставок* – это дискретная случайная величина, подчиняющаяся биномиальному распределению вероятности, после того, как были определены полученное количество, вероятность обнаружения и среднее количество в поставке.
  36. Биномиальный коэффициент отражает тот факт, что в случае шести поставок, которые характеризуются как обнаруженные или не обнаруженные, гораздо чаще будут наблюдаться три обнаруженные и три не обнаруженные, чем случаи, в которых все будут обнаружены, или все не будут обнаружены. Это аналогично игре в кости, где бросающий кости игрок с большей вероятностью получит семь очков, чем две единицы.
  37. Альтернативный подход к округлению заключается в добавлении дополнительной вероятностной зависимости  $q^*$  от  $a^*$ , и затем к приписыванию ненулевой вероятности  $q^*[a^*] = a$  только кратным числам  $a$ . Однако такой метод потребует значительно большего количества экспертных оценок и поэтому реализовать его будет более трудно.
  38. Это предположение, например, приводит к тому, что вероятность обнаружения не изменяется при повторных запрещениях (даже если контрабандист изменит маршруты в поиске не отслеживаемых каналов), и что возможности разведывательных агентств не изменяются; эти предположения могут быть смягчены изменением параметров модели обнаружения.
  39. E. Paté-Cornell, “Fusion of Intelligence Information: A Bayesian Approach,” *Risk Analysis* 22 (2002): 445–54; Gary McClelland, “Use of Signal Detection Theory as a Tool for Enhancing Performance and Evaluating Tradecraft in Intelligence Analysis,” in *Intelligence Analysis: Behavioral and Social Scientific Foundations*, ed. Baruch Fischhoff and Cherie Chauvin (Washington: National Academies Press, 2011), 83–99.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Данные модели

Модель требует обширных данных, которые могут быть получены из разнообразных источников. Моделям байесовских сетей необходимы экспертные заключения по распределениям вероятности количеств компонентов и материалов по странам происхождения. Данные по конструкциям центрифуг для модели оптимизации также сильно зависят как от заключений экспертов<sup>30</sup>, так и от оценок из опубликованных статей<sup>31</sup>. В таблице А1 перечислены некоторые значения для количеств обработанных компонентов и материалов (в отличие от их сырьевых форм), требующихся для центрифуг Р-1 и Р-2.

Предполагается, что для роторов конструкции Р-1 применяются только высокопрочные алюминиевые сплавы. Корпуса центрифуг Р-1 могут быть изготовлены из сплавов низких сортов, которые, как предполагается, доступны северным корейцам (рисунок А1).

Таблица А1. Количества компонентов и материалов, требующихся для одной центрифуги различных конструкций.

Компонент или материал	Требуемое количество (на одну центрифугу)	
	Р-1	Р-2
Самоустанавливающиеся подшипники	1	1
Блоки контроллеров	1/1000	1/1000
Высокопрочные алюминиевые сплавы	0,9 кг	0 кг
Мартенситно-старяющая сталь	0,75 кг	6 кг
Специальные масла	1	1

Оценивается, что один программируемый логический контроллер S7-417 PLC фирмы "Siemens" достаточен для управления шестью каскадами по 164 центрифуги в каждом.

### Математическая формулировка модели оптимизации центрифуг

Модель оптимизации центрифуг используется в данном анализе для того, чтобы определить оптимальное количество центрифуг каждого типа, которые могут быть изготовлены с учетом доступных запасов материалов (результата выборки из распределений байесовской сети). Цель такой оптимизации состоит в определении максимума производственных мощностей обогащения урана в программе северной Кореи (в кг-ЕРР/год), и она формулируется как:

$$\begin{aligned} \max f(\mathbf{x}) &= \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{при условии } \mathbf{P}\mathbf{x} &\leq \mathbf{s} \\ \mathbf{x} &\geq 0 \end{aligned}$$

где:

- c** – это вектор потенциальных мощностей обогащения урана (в кг-ЕРР/год) для различных конструкций центрифуг;
- x** – это вектор потенциального количества центрифуг различных типов, изготовленных из доступных компонентов (то есть вектор проектных переменных);
- P** – это матрица значений параметров требующихся компонентов и материалов, необходимых для различных конструкций центрифуг;
- s** – это вектор доступных запасов компонентов и материалов для центрифуг.

Модель  $f(\mathbf{x})$  аддитивна, и она просто означает, что мощность обогащения равняется сумме количеств обогащенного урана, которые могут быть получены с помощью всех имеющихся центрифуг. Ограничения означают, что общее количество компонентов, используемых для изготовления центрифуг, меньше доступных величин, или равно им. Эта модель также предполагает, что вектор **c** оптимизирован таким образом, чтобы количество центрифуг различных типов обеспечивало максимальную производственную мощность обогащения.

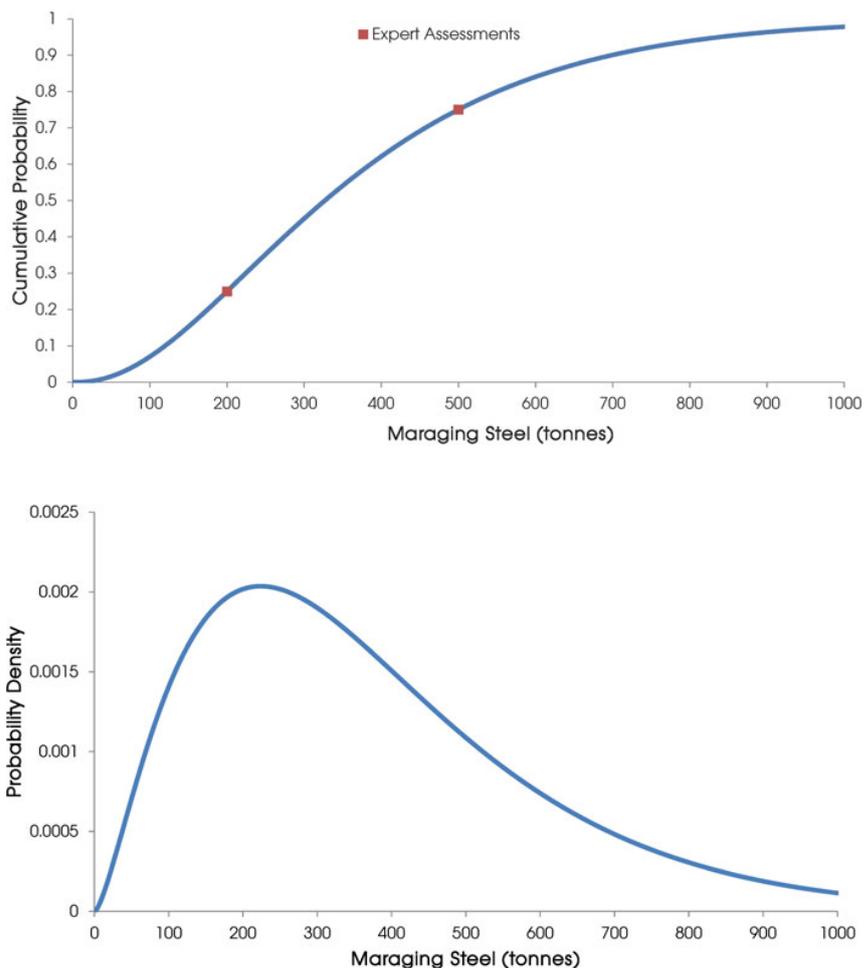


Рисунок А1. Подгонка гамма-распределения к экспертным оценкам для импорта мартенситно-старееющей стали из России. На верхнем рисунке показана кумулятивная функция распределения, а на нижнем рисунке – функция плотности вероятности. По горизонтальной оси отложено количество мартенситно-старееющей стали в тоннах. На вертикальной оси верхнего рисунка показано значение кумулятивной вероятности, а на вертикальной оси нижнего рисунка – плотности вероятности. Надпись над рисунком: экспертные оценки.

### Выявленные данные

Данные, использованные в этой статье для иллюстрации, представляют экспертные заключения Зигфрида Хекера и Хаима Брауна из Центра по международной безопасности и сотрудничеству Стэнфордского университета (рисунок А2).

Величины, приведенные в таблице А2, являются оценками приобретенного сырья, в отличие от количеств, приведенных в таблице А1, которые относятся к готовым изделиям. Для оценки производственных потерь использовались мнения экспертов. Отметим, что мартенситно-старееющая сталь сорта 350 включена в перечень экспортного контроля за изделиями двойного использования Группы поставщиков ядерного оборудования, но сталь сорта 250 не включена в него, поскольку она широко применяется в промышленности, и поэтому ее будет несколько легче приобрести. Процесс производства стали сорта 350 освоен только в нескольких странах. Изготовление стали сорта 250 не требует очень строгого контроля за вакуумом и плавкой, а также за термомеханической обработкой. Поэтому сталь сорта 250 легче импортировать, или наладить в Северной Корее ее собственное производство. Информации об использовании стали сорта 250 в коммерческих каскадах центрифуг очень немного, но для небольших производственных установок (например, тех, необходимы для производства ВОУ для нескольких ядерных боеприпасов), уменьшение производительности примерно на 20 – 30 процентов можно считать приемлемым (таблица А3).

Для представления специальных масел и кольцевых магнитов в модели, любые частные контрактные со-

глашения с иностранными компаниями об изготовлении кольцевых магнитов из китайского самариевого сырьевого материала, а также о приобретении специальных масел из различных источников характеризуюся как "отечественное производство".

### Формулировка субмодели обнаружения

Для формулировки субмодели обнаружения используются следующие обозначения:

- Дискретные случайные переменные обозначаются заглавными буквами под знаком тильды.
- Непрерывные случайные переменные обозначаются строчными буквами под знаком тильды.
- Условное распределение вероятности случайной переменной  $X^{\sim}$  при условии, что случайная переменная  $Y^{\sim}$  равна величине  $y$ , обозначается как  $P(X^{\sim} | Y^{\sim}=y)$ .
- Биномиальный коэффициент в разложении  $(x + y)^n$  обозначается как  $\binom{n}{b}$ .

Country	P(Assistance)	ImportAmt   Assistance_Country = T			x1 < ImportAmt_Country < x2		Probability of Detection			Amt Carried by Mode		
		Distribution	$\alpha$	$\beta$	a	b	p_air	p_land	p_sea	x_air	x_land	x_sea
Russia	0.85	Gamma	2.46	153.44	14000	35000	0.001	0.005	0.02	1000	500	10000
China	0.95	Gamma	0.97	37.37	15000	40000	0.001	0.005	0.02	1000	500	10000
Europe	0.8	Gamma	1.79	123.59	5000	15000	0.001	0.005	0.02	1000	500	10000
Pakistan	0.95	Gamma	0.97	37.37	500	4000	0.001	0.005	0.02	1000	500	10000
Iran	0.9	Gamma			500	4000	0.001	0.005	0.02	1000	500	10000

MODE OF TRANSPORTATION ASSESSMENTS				
Country	P(Air)	P(Land)	P(Sea)	SUM
Russia				
ImportAmt_Country < a	0.05	0.6	0.35	1
a < ImportAmt_Country < b	0.01	0.5	0.49	1
ImportAmt_Country > b	0.01	0.25	0.74	1
China				
ImportAmt_Country < a	0.05	0.6	0.35	1
a < ImportAmt_Country < b	0.01	0.5	0.49	1
ImportAmt_Country > b	0.01	0.25	0.74	1
Europe				
ImportAmt_Country < a	0.05	0.6	0.35	1
a < ImportAmt_Country < b	0.01	0.5	0.49	1
ImportAmt_Country > b	0.01	0.25	0.74	1
Pakistan				
ImportAmt_Country < a	0.05	0.6	0.35	1
a < ImportAmt_Country < b	0.01	0.5	0.49	1
ImportAmt_Country > b	0.01	0.25	0.74	1
Iran				
ImportAmt_Country < a	0.05	0.6	0.35	1
a < ImportAmt_Country < b	0.01	0.5	0.49	1
ImportAmt_Country > b	0.01	0.25	0.74	1

INDIGENOUS CAPABILITY ASSESSMENTS		
Technical Knowledge	P(True)	P(False)
Technical Knowledge	0.4	0.6
Manufacturing		
TRUE	P(Manufacturing   TK = T) = 0.1	P(Manufacturing   TK = F) = 0.01
FALSE	0.9	0.99
P(IndigCap)	0.04	

Рисунок А2. Вероятности, оцененные экспертами в качестве входных параметров, и параметры гамма-распределений, подогнанных соответствующим образом.

Таблица А2. Количества компонентов и материалов, требующихся для одной центрифуги различных конструкций.

Процентиль	Россия	Китай	Европа и Япония	Иран	Пакистан
Алюминиевый сплав 7075 (тонны)					
10	50	3	25	1	3
90	150	75	125	13	25
Мартенситно-старееющая сталь сорта 250 (тонны)					
10	25	3	3	1	3
90	150	50	75	3	13
Мартенситно-старееющая сталь сорта 350 (тонны)					
10	25	1	3	1	1
90	125	13	50	1	8
Самоустанавливающиеся подшипники					
10	1 000	2 000	5 000	100	100
90	10 000	10 000	10 000	300	1 000
Блоки управления					
10	2 000	2 000	5 000	100	100
90	10 000	10 000	10 000	300	300

В некоторых странах для сильфонов используется мартенситно-старееющая сталь сорта 300. Ее производство также является довольно сложным и поэтому для целей наших оценок в этой таблице сорта 300 и 350 объединены.

В дополнение к помощи и полученному количеству (то есть неопределенностям, которые проявляются в вероятностной модели), субмодель обнаружения включает такие неопределенности, как: количество, полученное конкретным способом транспортировки ( $q^-$ )<sup>32</sup>, вероятность обнаружения ( $p^-$ )<sup>33</sup>, среднее количество в поставке ( $a^-$ )<sup>34</sup>, и количество обнаруженных поставок ( $X^-$ )<sup>35</sup>. Количества, полученные каждым методом транспортировки, суммируются, чтобы получить полное количество, полученное из определенного источника.

Входными параметрами, требующимися для данной модели, служат вероятности обнаружения. В настоящее время модель предоставляет входные параметры, обусловленные различными способами транспортировки (включая поставки по земле, морю и воздуху). Например, задавая конкретное количество высокопрочных алюминиевых сплавов, импортируемых из Китая, субмодель обнаружения использует оценку количества материала, доставленного каждым способом транспортировки. Однако, модель может быть легко приспособлена к вероятностям, не зависящим от способа доставки. Хотя оценка вероятностей, зависящих от способа доставки, существенно повлияет на результаты анализа, они будут частично зависеть от того, как страны обнаруживают контрабандные поставки (например, если события обнаружения связаны с отчетностью по заказам на покупку или с электронными сообщениями, а не с действиями сотрудников таможни). Небольшие различия в вероятностях обнаружения, соответствующих двум различным способам транспортировки, могут повлечь за собой сильное различие в вероятностных распределениях количества контрабандных товаров из-за различия в тоннаже и объеме, доступном для каждого способа транспортировки.

Таблица А3. Вероятность внутреннего производства материалов и компонентов для центрифуг (экспертные оценки).

Материал	Вероятность
Алюминиевый сплав 7075	0,1
Мартенситно-стареющая сталь сорта 250	0,2
Мартенситно-стареющая сталь сорта 350	0,05
Специальные масла	0,95
Самоустанавливающиеся подшипники	0,2
Блоки управления	0,2
Кольцевые магниты	0,9

В вероятностной модели вероятность обнаружения представляется тремя бета-распределениями, по одному на каждый способ транспортировки. Поэтому в настоящее время вероятность обнаружения для каждого компонента также представляется тремя бета-распределениями, по одному на каждый способ транспортировки. Моды этих распределений примерно одинаковы, но их дисперсии увеличиваются при переходе от воздушной транспортировки к наземной и далее к морской, что отражает мнение о том, что вероятность обнаружения при транспортировке по морю больше, чем транспортировке по воздуху. Помимо способа транспортировки, субмодель обнаружения требует также оценки (либо вероятностной, либо детерминированной) среднего количества на одну поставку. После того, как все требуемые распределения вероятностей будут запрограммированы, в субмодели обнаружения далее предполагается, что количество обнаруженных поставок подчиняется биномиальному распределению с учетом полученного количества, вероятности обнаружения, и среднего количества на одну поставку согласно уравнению (A1)<sup>36</sup>. Член  $[q/a]$  в уравнении (A1) округляется до ближайшего большего целого числа<sup>37</sup>.

$$P(\tilde{X} = i | \tilde{Q} = q | \tilde{a} = a | \tilde{p} = p) = \binom{\lceil q/a \rceil}{i} p^i (1-p)^{\lceil q/a \rceil - i} \quad (A1)$$

После этого система Netica™ позволит рассчитать распределение вероятности количества обнаруженных поставок (распределение выходного параметра байесовской сети), которое, в свою очередь, позволит вывести распределение вероятности количества материала или компонента, которое было получено Северной Кореей от иностранных поставщиков в зависимости от конкретного числа событий обнаружения. Поскольку правдоподобность сигналов данного обнаружения уже была запрограммирована, это обновление позволяет включить новую информацию в вероятностную модель без дополнительного получения заключения экспертов после каждого обнаружения.

В представленной выше вероятностной модели предполагается, что каждое событие обнаружения является независимым испытанием по схеме Бернулли, что означает, что каждое событие независимо от всех

прочих условий реализаций случайных переменных  $q$ ,  $p$  и  $a$ , и что вероятность обнаружения и среднее количество на одну доставку не меняется с временем<sup>38</sup>. Кроме того, в субмодели обнаружения предполагается, что вероятность обнаружения не зависит от среднего количества на одну доставку. И, наконец, предполагается, что обнаружения являются идеальными, что означает, что наблюдения из разведывательных источников предполагаются истинными и точными. Методы смягчения этого последнего предположения обсуждались в нескольких статьях<sup>39</sup>. Одной из проблем в принятии этих методов является то, что трактовка множественных неидеальных сигналов обнаружения как вероятностно зависимых сильно усложняет работу эксперта по оценке распределений зависимых переменных обнаружения для всех материалов или компонентов. Поэтому обнаружения рассматриваются в модели как идеальная информация, перенося бремя оценки обнаружений на аналитика, который должен будет принять *априорное* решение по достоверности каждого обнаружения и включить его в подсчет числа обнаружений, если оно будет оценено как истинное (или не включать его в противном случае).