

## ТЕОРЕТИКО-ИГРОВОЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ И ОПТИМИЗАЦИИ ЯДЕРНЫХ ГАРАНТИЙ

*Ребекка М. Уорд и Эрик А. Шнейдер*

В данной статье представлено новое применение инспекционной игры для поиска оптимально эффективных стратегий ядерных инспекций. Она описывает методологию, которая выделяет ресурсы на предприятиях ядерного топливного цикла и среди них для ограниченного расходами инспекционного аппарата, стремящегося обнаружить поддерживаемое государством отвлечение или неправильное использование. Методология соединяет теоретико-игровую решающую программу для одновременной игры с вероятностной моделью для имитации сценариев государственного нарушения на заводе обогащения с газовыми центрифугами. Имитационная модель характеризуется набором защитных вариантов, основанных на текущей практике Международного агентства по атомной энергии и аналогичным меню атакующих вариантов на пути распространения. Моделирование передает информацию в теоретико-игровую решающую программу для расчета вероятности обнаружения для заданной стратегии пары инспектора и распространителя. Для расчета результата программа оценивает вероятность обнаружения для количества и качества полученного материала. Используя модифицированный фиктивный игровой алгоритм, игра итеративно вызывает имитационную модель до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие Нэша, и выводит оптимальные стратегии инспекции и распространения. Цена, которую атакующий участник присваивает количеству и качеству материала, меняется для того, чтобы получить результаты, представительные для государств с различными возможностями и целями. Показана выборка результатов модели для иллюстрации зависимости стратегий защищающей и атакующей сторон от характеристик атакующей стороны.

Ребекка М. Уорд работает в подразделении "Ядерные расследования" Техасского университета в Остине, Остин, Техас, США.

Эрик А. Шнейдер работает в ядерной и радиационной технической программе Техасского университета в Остине, Остин, Техас, США.

Почтовый адрес для корреспонденции: Erich A. Schneider, Associate Professor, Nuclear and Radiation Engineering Program, The University of Texas at Austin, 1 University Station C2200, Austin, TX 78712, USA.

Адрес электронной почты: [eschneider@mail.utexas.edu](mailto:eschneider@mail.utexas.edu)

Статья получена 7 февраля 2014 года и принята к публикации 27 июля 2015 года.

### ВВЕДЕНИЕ

Опасения ядерного распространения возросли, отражая глобальное увеличение интереса к гражданской ядерной энергетике и распространение технологий коммерческого топливного цикла. Совпадение таких факторов предъявило серьезные требования к департаменту гарантий Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), организации, на которую возложены задачи верификации ядерной деятельности в мирных целях. Гарантии МАГАТЭ традиционно применяются предписывающим способом в соответствии с установленным набором руководящих указаний. Реализация гарантий для государств в основном прозрачна, за исключением внеплановых инспекций на месте. Поэтому режим выдвигает высокие требования к физическим инспекциям, которые дороги и интенсивно используют трудовые ресурсы.

Бюджетные ограничения стимулировали усилия для увеличения эффективности МАГАТЭ посредством разработки инструментов для помощи в принятии решений по выделению ресурсов. Многие такие инструменты направлены на анализ путей отвлечения и основаны на вероятностных методах<sup>1</sup>. Хотя вероятностные методы полезны для описания фундаментально случайных событий, таких, как природные катаклизмы, их применение к состязательным проблемам попало под пристальное внимание. Обычная критика основана на том факте, что для многих проблем безопасности данные слишком малочисленны для того, чтобы адекватно характеризовать угрозу или последствия атаки, и на понимании того, что вероятностные методы могут неполно описывать поведение преднамеренных игроков, таких, как недоброжелательное государство или террорист<sup>2</sup>. Преднамеренные игроки представляют особый класс угроз, поскольку они обладают способностью наблю-

дать оборонительные меры и соответственно корректировать свои действия<sup>3</sup>. Кокс в своей работе отражает такой скептицизм, в особенности критикуя применение случайных узлов в анализе дерева отказов для моделирования состязательных решений, и аргументируя это тем, что такие решения выбираются на основании состязательных суждений, а не управляются случаем. Кокс и другие предполагают, что теоретико-игровой подход к интеллектуальному анализу риска может оказаться более подходящим. В свете такой воспринимаемой слабости существующего объема работ в данной статье представляется теоретико-игровая методология для исследования стратегий оптимального выделения ресурсов МАГАТЭ для обнаружения незаконного поведения государства в находящейся под гарантиями программе обогащения на газовых центрифугах (GCEP).

## ПРЕДЫДУЩИЕ РАБОТЫ

Примеры использования вероятностных методов моделирования для анализа путей отвлечения многочисленны. Одним из таких примеров является Инструмент интегрированного анализа системы гарантий (LISSAT), разработанный в Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса. Это непрерывная временная модель для расчета эффективности системы гарантий на предприятиях топливного цикла, в которой структура диграфа дерева отказов используется для проверки возможных точек отказа системы гарантий, приводящего к различным событиям отвлечения<sup>4</sup>. Другим примером является разработанный в Брукхейвенской национальной лаборатории инструмент оценки распространения на базе марковской модели<sup>5</sup>. В модель включены как внутренние, так и внешние барьеры для распространения, включая варианты набора гарантий МАГАТЭ. Она оценивает метрики интереса, включая минимальное время и стоимость распространения, вероятность обнаружения, и техническую трудность пути отвлечения.

В этих и других методах изучаются уязвимые пути распространения на одном предприятии. Дополнительная работа характеризует устойчивость к распространению на нескольких предприятиях в системе топливного цикла. Методология оценки устойчивости к распространению и физической защиты (PR & PP), разработанная группой экспертов Международного форума четвертого поколения<sup>6</sup>, направлена на оценку устойчивости к распространению системы атомной энергетики в целом по отношению к другим системам атомной энергетики. Результат рассчитывается с использованием анализа полезности с несколькими атрибутами, включая вероятность обнаружения, длительность распространения, и "пригодность к гарантиям".

Эти вероятностные инструменты, хотя они и полезны для разработки сигнатуры события отвлечения, или для оценки относительной сопротивляемости к распространению для различных систем топливного цикла, могут не оказаться вполне подходящими для принятия решений по выделению ресурсов. Они сильно зависят от пользовательского ввода при моделировании сценариев отвлечения, и поэтому сценарии ограничиваются теми, которые могут вообразить аналитики. Более важно то, что эти методы неспособны охватить интеллигентную и приспособляемую природу противника, а именно, его способность наблюдать статическую или прозрачную защиту и соответственно изменить свою стратегию.

Теория игр – это популярный метод для моделирования состязательных ситуаций из-за его способности воспроизводить рациональное человеческое понимание и поведение, и, как таковой, он исторически применялся к гарантиям и инспекционным ситуациям<sup>7</sup>. Например, Авенхаус представил теоретико-игровую трактовку верификации данных учета материалов на ядерных предприятиях<sup>8</sup>. Рассматривался анализ выборки атрибутов из нескольких групп, и была приведена математическая формулировка оптимальной стратегии инспектора. Эта формулировка стала основанием текущей парадигмы выборки атрибутов МАГАТЭ. Исследовалось выделение оборонительных ресурсов для нескольких предприятий, и были приведены оптимальные стратегии инспектора и инспектируемого для сценария с небольшим количеством предприятий.

Килгоур и Авенхаус применили теорию игр и теорию решений для исследования соотношения стоимости и эффективности инспекций МАГАТЭ и рекомендовали стратегии для улучшения эффективности<sup>9</sup>. Их работа показала, что мотивация государства для нарушения зависит от политических параметров – а именно от восприятия наказания, которого ожидает государство за обнаруженное незаконное поведение, а также от технического параметра, эффективности инспекции.

Эта предыдущая работа по своей природе является теоретической и представляющей математическую формулировку для стратегий и вероятностей обнаружения. Задачи последней работы в основном не требовали того, чтобы отдельные гарантии были представлены на реалистичном уровне подробностей. Более того, комплексная природа игровой формулировки привела других к ограничению своей области действия расчетом равновесия Нэша<sup>10</sup>.

Применив теоретико-игровой подход к конкретной стратегии распространения, Браун и др. представили более прикладную двухступенчатую минимаксную игру Штакельберга, представляющую противодействующую сторону, старающуюся максимально задержать распространителя, который старается произвести

первую партию делящегося материала<sup>11</sup>. Модель предполагает, что распространитель наблюдает оборонительную стратегию противодействующей стороны и соответственно корректирует свою стратегию. Включение подчиненной модели подробного управления проектом, которая соединена с игровой моделью для оптимизации, позволяет описать сценарий отвлечения, применив параметрическую модель. Инструмент моделирования в этой работе расширяет подход Брауна с использованием подчиненной модели для генерации результатов для каждой стратегии противодействующей стороны и распространителя.

Альтернативным подходом к моделированию поведения интеллигентного противника служит моделирование на базе агента (ABM), которое стремится объяснить и предсказать динамику группы, моделируя индивидуальное поведение и взаимодействия. Инструмент моделирования на базе байесовского агента (BANE) был разработан для того, чтобы моделировать взаимодействие между обороняющимся и нападающим не распространяющимися агентами и исследовать взаимное влияние между факторами стороны спроса и стороны предложения, которые могут повлиять на предрасположение государства к стремлению к ядерному оружию<sup>12</sup>. Хотя эта модель прекрасно отражает адаптивную природу обеих агентов, она принимает широкий взгляд на уровне сети, противостоящий более детальному подходу на уровне предприятия, представленному в настоящей работе.

## ИГРОВАЯ МОДЕЛЬ

В данной работе игра моделируется как одновременная игра двух игроков с нулевой суммой (TPZS), или игра Курно. Игра TPZSG используется для моделирования взаимодействия между двумя игроками с диаметрально противоположными целями – в данном случае атакующая сторона стремится минимизировать выигрыш, а защищающаяся сторона стремится максимизировать выигрыш. Хотя игра TPZSG не является идеальной моделью для сложного взаимодействия между государством, обдумывающим незаконное поведение, и международным инспекционным аппаратом, она применяется здесь из-за ее простоты и гибкости. Игра TPZSG решается с ограниченными математическими и (или) вычислительными затратами, которые позволяют внести дополнительное многообразие и сложность в имитационную модель. Кроме того, использование игры TPZSG представляет собой консервативное предположение, поскольку она предоставляет защищающейся стороне возможность выбора стратегии в сценарии наихудшего случая, то есть, против наиболее опасной стратегии атакующей стороны.

В одновременной игре оба игрока обладают полным знанием вариантов стратегии, доступных другому игроку, но каждый игрок должен придерживаться своей стратегии перед тем, как он определит, какой стратегии придерживается другой игрок. Предположение идеального знания представляет собой модельную идеализацию упрощение; в действительности невероятно (и нежелательно), чтобы противник обладал идеальным знанием вариантов, доступных защищающейся стороне, и своих шансов нанести поражение каждой стратегии защищающейся стороны. Тем не менее, это предположение более реалистично для противников-инсайдеров, подобных распространяющему государству, чем для посторонних, учитывая знания инсайдерами мер безопасности и эксплуатационных процедур. Так же, как и игра TPZSG, такое предположение в целом является консервативным, поскольку оно находит оптимальные стратегии защищающейся стороны против более информированного, и поэтому более способного противника.

Игра решается применением алгоритма фиктивной игры (FP). Фиктивная игра представляет собой алгоритм "близоручного обучения", впервые использованный Брауном для определения стоимости в игре TPZSG<sup>13</sup>. Фиктивная игра является альтернативой стандартного симплекс-метода и может обладать преимуществом для больших линейных систем<sup>14</sup>. Фиктивная игра применяется в данной работе поскольку, в отличие от симплекс-алгоритма, она исключает требование предварительного заполнения матрицы выигрыша, что драматически сокращает количество вызовов моделирования, необходимых для решения игры. В процессе фиктивной игры каждый игрок предполагает, что его оппонент играет в стационарной стратегии, и что два игрока участвуют в конечной итеративной игре. В каждом раунде игрок выбирает свой миопический наилучший отклик на распределение стратегий, по которым оппонент играл до этого момента; то есть, он выбирает отклик, который будет максимизировать его ожидаемый выигрыш в следующем раунде игры. Джулия Робинсон показала, что все игры TPZSG сходятся к равновесному значению Нэша по мере приближения количества итераций к бесконечности<sup>15</sup>.

На рисунке 1 показана графическая схема игровой модели и ее взаимодействие со стимулятором. Стратегии защищающейся и нападающей стороны соответственно обозначены индексами  $i$  и  $j$ , где  $i \in [0, I]$  и  $j \in [0, J]$ . Чистые стратегии атакующей и обороняющейся стороны<sup>16</sup> соответственно обозначаются как  $y_j$  и  $x_i$ . Выигрыш для стратегии обороняющейся стороны  $x_i$  и стратегии атакующей стороны  $y_j$  равен  $V_{ij}$ .  $x$  представляет собой вектор с  $I$  элементами, который содержит смешанную историю стратегии обороняющейся стороны;  $i$ -ый

элемент увеличивается на единицу, когда защищающаяся сторона играет чистую стратегию  $x_i$ , и значения вектора нормируются таким образом, что сумма элементов в  $x$  равняется 1.  $y$  представляет собой такую же смешанную историю стратегии атакующей стороны.

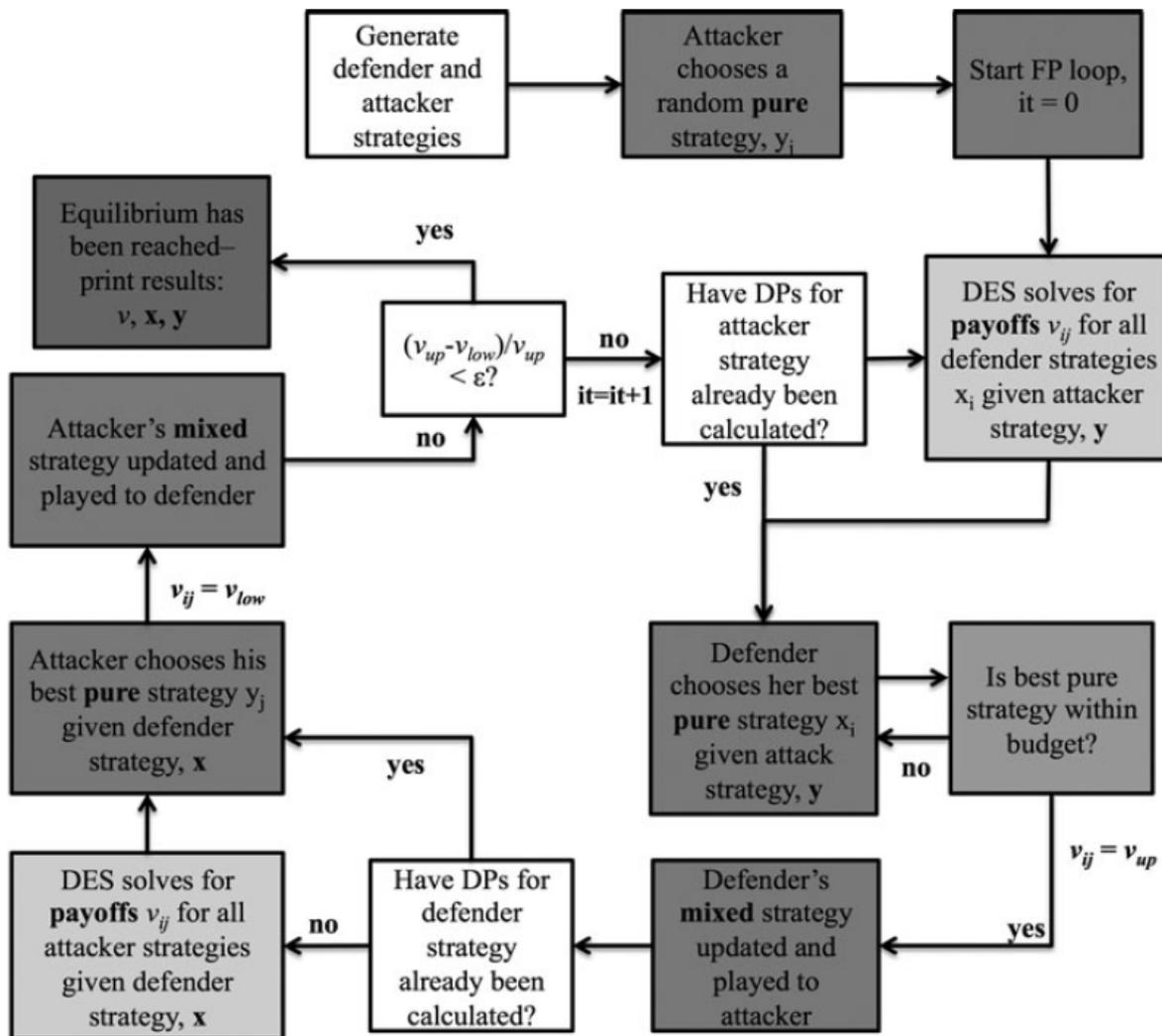


Рисунок 1. Графическая схема логики модели. Надписи на рисунке (слева направо и сверху вниз): 1 – Было достигнуто равновесие – печать результатов  $v, x, y$ ; 2 – **Смешанная** стратегия атакующей стороны обновляется и играется с обороняющейся стороной; 3 – Атакующая сторона выбирает свою наилучшую **чистую** стратегию  $y_j$ , учитывая стратегию обороняющейся стороны  $x$ ; 4 – Подпрограмма DES определяет **выигрыши**  $v_{ij}$  для всех стратегий атакующей стороны, учитывая стратегию обороняющейся стороны  $x$ ; 5 – Генерация стратегий атакующейся и обороняющейся стороны; 6 – да; 7 – нет; 8 – Были ли уже рассчитаны вероятности обнаружения DP для стратегии обороняющейся стороны?; 9 – Атакующая сторона выбирает случайную **чистую** стратегию  $y_j$ ; 10 – Были ли уже рассчитаны вероятности обнаружения DP для стратегии атакующей стороны?; 11 – Обороняющаяся сторона выбирает свою наилучшую **чистую** стратегию  $x_i$ , учитывая стратегию атакующей стороны  $y$ ; 12 – **Смешанная** стратегия обороняющейся стороны обновляется и играется с атакующей стороной; 13 – Начало цикла фиктивной игры; 14 – Подпрограмма DES определяет **выигрыши**  $v_{ij}$  для всех стратегий обороняющейся стороны, учитывая стратегию атакующей стороны  $y$ ; 15 – Находится ли лучшая чистая стратегия в пределах бюджета?

Алгоритм фиктивной игры инициируется атакующей стороной, случайным образом выбирающей и играющей чистую стратегию  $y_j^{(0)}$  (блок "Начать цикл фиктивной игры" на рисунке 1). Вызывается симулятор, который рассчитывает выигрыши  $v_{ij}$  для всех стратегий обороняющейся стороны  $x_i$  с учетом стратегии атакующей стороны  $y$ , и полученные результаты сохраняются в матрице выигрышей. Зная выигрыши для всех стратегий обороняющейся стороны, которые могут быть сыграны в ответ на  $y_j^{(0)}$ , обороняющаяся сторона выбирает за-

тем отклик чистой стратегии  $x_i^{(1)}$ , который максимизирует ее выигрыш в следующем раунде. После выбора наилучшего отклика проверяется стоимость стратегии, чтобы увидеть, укладывается ли стратегия в бюджет. Если это так, то стратегия играет и обновляется смешанная стратегия обороняющейся стороны. Если это не так, то обороняющаяся сторона выбирает свой следующий отклик наилучшей чистой стратегии. Обороняющаяся сторона продолжает выбирать свой следующий отклик наилучшей чистой стратегии до тех пор, пока она не выберет то, что она может себе позволить. После того, как она выберет и сыграет свой наилучший отклик стратегии  $x_i^{(1)}$ , будет инициализирована переменная  $v_{up}$ , значение которой будет приравнено величине  $v_{ij}^{(1,0)}$ . После этого снова будет вызван симулятор, который рассчитает выигрыши  $v_{ij}$  для всех стратегий атакующей стороны  $y_j$  в ответ на наилучшую чистую стратегию обороняющейся стороны  $x_i^{(1)}$ . Атакующая сторона выберет свою наилучшую чистую стратегию отклика  $y_j^{(1)}$ , учитывая текущую историю стратегии защищающейся стороны  $x$ . Переменная  $v_{low}$  устанавливается равной значению выигрыша  $v_{ij}^{(1,1)}$ . Атакующая сторона играет свой наилучший отклик чистой стратегии  $y_j^{(1)}$  и ее смешанная стратегия обновляется соответствующим образом. Эти действия представляют собой один цикл фиктивной игры, после которого проверяется сходимость. Сходимость модели считается достигнутой, если критерий сходимости  $(v_{up} - v_{low})/v_{up} < \varepsilon$ . Для результатов, представленных в данной статье,  $\varepsilon = 0,001$ . При достижении сходимости смешанные стратегии  $x$  и  $y$  соответственно являются равновесными стратегиями обороняющейся и атакующей сторон, и  $v_{up} = v_{low} = v$ , равновесному значению для игры. Если сходимость все еще не достигнута, то управление возвращается в цикл фиктивной игры.

## ЛОГИКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

На рисунке 2 показана логическая схема имитационной модели (симулятора). При вызове симулятора игра передает всю информацию о стратегии обороняющейся и атакующей стороны, необходимую для определения пары стратегий или сценария. Симулятор использует эти входные данные для создания расписания событий обороняющейся и атакующей стороны на протяжении периода моделирования. Длительность периода моделирования определяется стратегией атакующей стороны. Первый день моделирования определяется как день, в который атакующая сторона начинает свою противоправную деятельность. Атакующая сторона определяет длительность атаки (если только атака не является одиночным событием, в котором случае она продолжится только один день). Период моделирования будет продолжаться после окончания атаки для того, чтобы предоставить обороняющейся стороне время для обнаружения пропавшего материала и перевода предприятия в "состояние тревоги"<sup>17</sup>. Для представленных здесь результатов длительность обнаружения после диверсии определяется в тридцать дней, что соответствует целям своевременности реагирования МАГАТЭ для обнаружения существенного количества необлученного высокообогащенного урана (БОУ)<sup>18</sup>.

День моделирования начинается с цикла по всем развернутым гарантиям,  $k$ , для того, чтобы убедиться, что каждая из них активна в день  $t = 1$ . Значения индекса  $k \in [0, K]$  перечисляют все гарантии. После того, как будет идентифицирована каждая активная гарантия, будет проведена проверка того, будет ли такая мера эффективна против активной стратегии атакующей стороны. Если мера гарантии  $k$  является эффективной против атакующей стратегии  $y_j$ , то рассчитывается суточная вероятность обнаружения для этой пары  $DP_{j,k}$ . Алгоритмы, используемые для расчета вероятности обнаружения  $DP$ , зависят от выбранной пары гарантии и атакующей стороны; они вкратце описаны в разделе "Модель имитации завода GCEP" данной статьи, и, более подробно, в Приложении В и в работе<sup>19</sup>. После того, как будут рассчитаны выигрыши для всех активных гарантий в заданный день, этот процесс будет повторяться в каждый последующий день до тех пор, пока не закончится период моделирования. Совокупный выигрыш от каждого мероприятия гарантий в течение периода моделирования,  $DP_{cum,k}$ , рассчитывается сложением мультипликативных сумм по всем дням  $t \in [0, T]$ , как это показано на рисунке 2. Вероятность обнаружения  $DP$  для сценария в целом,  $DP_{i,j}$ , рассчитывается, комбинируя вероятности обнаружения при индивидуальных мерах гарантий, и выигрыш сценария,  $v_{i,j}$ , рассчитывается с помощью функции выигрыша,  $P$ , с весом вероятности обнаружения  $DP$  для сценария, пропорциональным количеству материала в сценарии. Наконец, сама величина выигрыша сценария возвращается в игру.

Моделируется завод обогащения с газовыми центрифугами (GCEP) с годовой производительностью 465 000 кг-ЕРР. Завод GCEP был выбран для данного конкретного исследования из-за его воспринимаемого риска распространения<sup>20</sup> и ресурсов, которые исторически выделяет МАГАТЭ для гарантий на предприятиях такого типа<sup>21</sup>. Предприятие было выбрано для представления завода, который может находиться в стране с зарождающимся собственным топливным циклом. На заводе используется сырье из природного урана с содержанием урана-235 в 0,711%, выходная продукция обогащена ураном-235 до 4,5%, а содержание уран-235 в отходах равно 0,22%. Годовые объемы материалов при нормальных условиях эксплуатации показаны в таблице 1. В третьем столбце таблицы 1 приводится количество баллонов каждого типа, предположительно

находящихся на хранении в любое заданное время. Предполагается, что на площадке в любое время хранится запас сырья на 84 дня, и что оператор должен хранить все баллоны с продукцией в течение 28 суток (по крайней мере один инспекционный цикл)<sup>22</sup>.

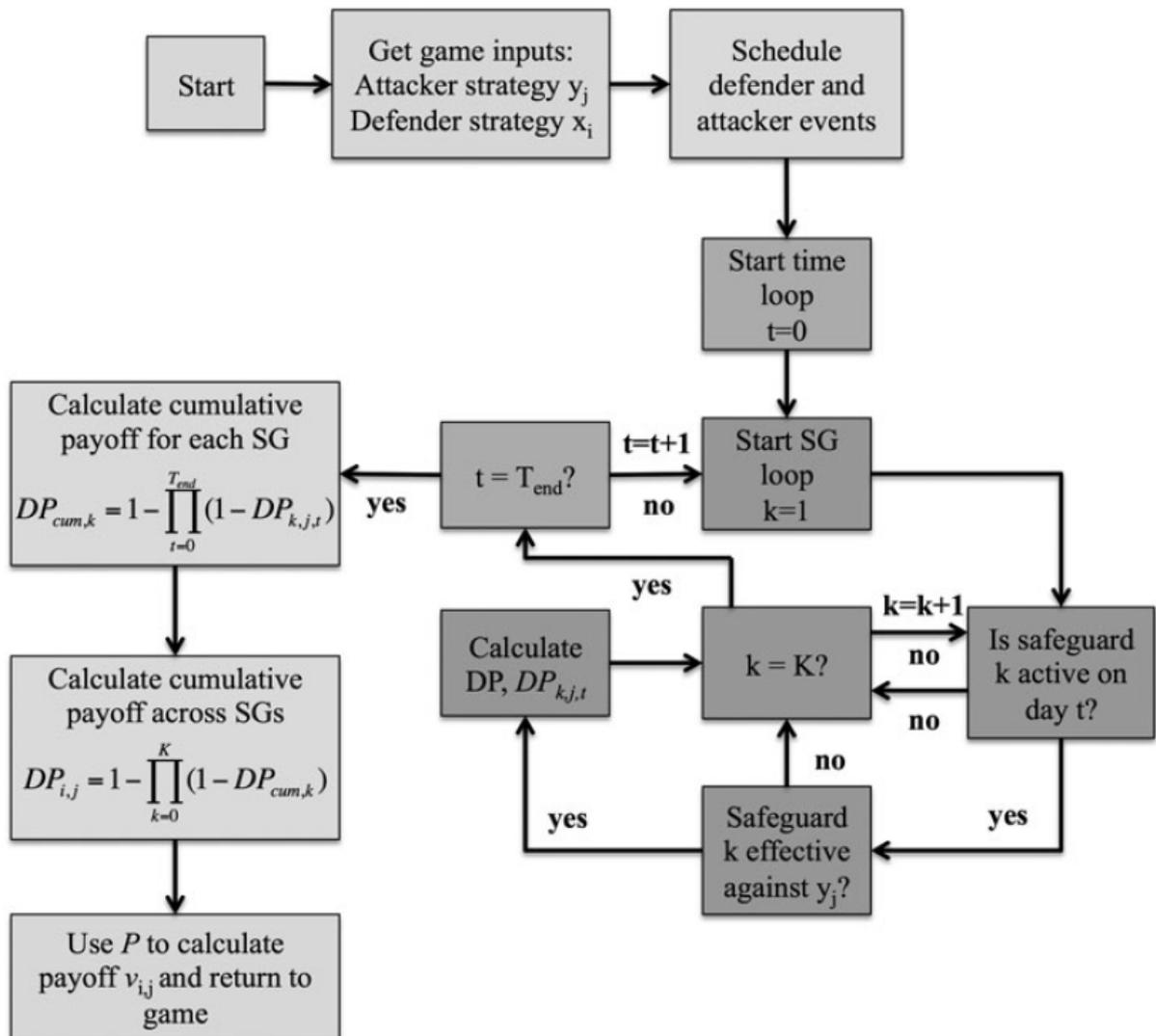


Рисунок 2. Логика моделирования. Надписи на рисунке (сверху вниз и слева направо): 1 – Старт; 2 – Получение исходных данных из игры: стратегия атакующей стороны  $y_j$ ; стратегия обороняющейся стороны  $x_i$ ; 3 – Расписание событий для обороняющейся и атакующей стороны; 4 – временного цикла;  $t = 0$ ; 5 – Расчет совокупного выигрыша для каждой стратегии игры; 6 – Начало цикла по стратегиям игры; 7 – Расчет совокупного выигрыша по всем стратегиям игры; 8 – Расчет вероятностей обнаружения; 9 – Активна ли гарантия  $k$  в день  $t$ ?; 10 – Эффективна ли гарантия  $k$  против стратегии  $y_j$ ?; 11 – Использование  $P$  для расчета  $v_{ij}$  и возврат в игру.

Варианты обороняющейся и атакующей сторон, использованные в программе моделирования завода GSEP, показаны в таблице 2, и вкратце рассмотрены ниже. Отмеченные ячейки показывают, что мера гарантии эффективна против соответствующего варианта атакующей стороны. Варианты атакующей стороны и варианты обороняющейся стороны, и алгоритмы, использованные для расчета вероятности обнаружения для каждой пары стратегий обороняющейся и атакующей сторон соответственно подробно описаны в Приложениях А и В. Следует отметить, что расчетные методы и исходные данные, используемые для расчета вероятности обнаружения, являются условными, хотя и репрезентативными. Были предприняты усилия для точного определения относительного влияния различных параметров обороняющейся и атакующей сторон на вероятности обнаружения (например, кражу больших количеств материала легче обнаружить, чем кражу меньших количеств материала); тем не менее, величины предназначены для того, чтобы позволить сравнение вариантов и они имеют значение только в относительном смысле. Если перечислить все возможные перестановки

различных доступных для игроков вариантов и субвариантов, то программа моделирования всего определяет 246 645 вариантов обороняющейся стороны и 321 вариант атакующей стороны.

Таблица 1. Годовые объемы материалов для завода GCEP с годовой производительностью 465 000 кг-EPP<sup>1</sup>.

Материал	Масса UF <sub>6</sub> (кг U)	Ежегодное количество баллонов	Количество баллонов, предположительно находящееся на хранении в любой момент времени
Сырье	552 500	65	13
Продукция	63 390	41	3
Отходы	489 200	57	–

<sup>1</sup>Непосредственный расчет; расчеты проверены на калькуляторе обогащения (uxs.com).

Таблица 2. Сводная таблица пар стратегий обороняющейся и атакующей сторон для предприятия обогащения. X означает, что вариант обороняющейся стороны эффективен против варианта атакующей стороны.

Варианты обороняющейся стороны	Варианты атакующей стороны					
	1	2	3	4	5	6
A	X	X	X			X
B		X				
C				X	X	
D				X	X	
E	X	X				
F			X	X		
G				X	X	
H			X	X	X	X
I				X	X	

Представленные в настоящей статье стратегии обороняющейся и атакующей стороны представляют собой одиночные действия по распространению на одиночном предприятии; однако, сила теоретико-игрового метода заключается в том, что он может быть распространен на моделирование и анализ системного уровня. Хотя это и не представлено здесь, эта модель продемонстрировала способность к моделированию систем из нескольких предприятий, что позволяет атакующей стороне выбрать направление атаки и впоследствии вынудить обороняющуюся сторону выделять ресурсы на несколько предприятий. Данная модель, как таковая, может быть использована для моделирования путей отвлечения или приобретения на уровне страны, включая угрозы от необъявленных предприятий. Расходы и методы обнаружения для необъявленных предприятий отличаются от тех, которые применяются к объявленным предприятиям, но они могут в принципе быть включены в модель простой интеграцией соответствующих входных параметров имитации. Листнер и Кэнти предложили четыре возможности моделирования вероятностей обнаружения на необъявленных предприятиях, включая байесовский и частотно-вероятностный подходы, которые могут быть включены в имитационную модель<sup>23</sup>.

### ВАРИАНТЫ АТАКУЮЩЕЙ СТОРОНЫ

У атакующей стороны для выбора есть шесть категорий атак, представляющих три различных типа атак: отвлечение объявленной продукции, неправильное использование предприятия для обогащения выше объявленных уровней и производство необъявленной продукции из необъявленного сырья. Стратегия атакующей стороны состоит только из одного варианта атаки и его определенных параметров, которые выбираются атакующей стороной из набора дискретных значений.

В таблице 3 перечислены все варианты атакующей стороны, их соответствующие параметры и их краткое описание. Заключенная в скобки отметка после названия варианта атаки – это отметка, используемая для ссылки на вариант в результатах моделирования.

### ВАРИАНТЫ ОБОРОНЯЮЩЕЙСЯ СТОРОНЫ

В таблице 4 перечислены все варианты обороняющейся стороны и соответствующие регулируемые параметры. Так же, как и в вариантах атакующей стороны, заключенная в скобки отметка после названия варианта обороняющейся стороны – это отметка, используемая для ссылки на вариант в результатах моделиро-

вания; эти отметки используются в разделе "Результаты". Стратегия обороняющейся стороны состоит из любого количества мероприятий активных гарантий, в зависимости от того, сколько может выбрать для приобретения обороняющаяся сторона. Подробное описание каждого мероприятия гарантий приведено в Приложении В.

Таблица 3. Варианты атакующей стороны и связанные с ними параметры.

Вариант атакующей стороны	Регулируемые параметры [допустимые значения]	Описание
1. Отвлечение баллона (cyltheft)	Количество баллонов [1, 2, 3]. Область [сырье, хранение].	Атакующая сторона отвлекает баллон (баллоны) из хранилища сырья или продукции в одноразовой атаке.
2. Отвлечение части материала из баллона (matcyl)	Частота [1, 7, 30 дней - 1]. Длительность [7, 30, 360 дней]. Общая масса [40, 110, 775 кг]. Количество баллонов [1, 2, 3].	Атакующая сторона отвлекает материал из баллона (баллонов) из хранилища продукции в непрерывной атаке.
3. Отвлечение материала из каскада (matcasc)	Частота [1, 7, 30 дней - 1]. Длительность [7, 30, 360 дней]. Масса, отвлеченная из каскада [0,010, 0,100 кг]. Количество каскадов [1, 6, 30].	Атакующая сторона отвлекает некоторую часть материала при обогащении продукции из каскада (каскадов) в непрерывной атаке.
4. Перезаполнение труб (repiping)	Длительность [7, 30, 360 дней]. Доля выделенных каскадов [0,0167, 0,1, 0,5]. Обогащение продукции [0,197, 0,50, 0,90].	Атакующая сторона перезаполняет каскады в одноразовой атаке и затем продолжает ежедневно производить материал в незаконной конфигурации каскада для производства материала, обогащенного выше объявленных значений.
5. Переработка материала в каскаде (recycle)	Частота [1, 7, 30 дней - 1]. Длительность [7, 30, 360 дней]. Количество каскадов [1, 6, 30]. Обогащение продукции [0,197, 0,50, 0,90].	Атакующая сторона перерабатывает материал в каскаде для производства материала, обогащенного выше объявленных значений.
6. Незаявленное сырье (udfeed)	Частота [1, 7, 30 дней - 1]. Длительность [7, 30, 360 дней]. Количество каскадов [1, 6, 30].	Атакующая сторона загружает необъявленный материал в каскад для переработки необъявленного сырья при обогащении продукции.

Таблица 4. Варианты обороняющейся стороны и регулируемые параметры.

Вариант обороняющейся Стороны	Регулируемые параметры [допустимые значения]	Описание
A. Инспекция (inspection) <sup>1</sup>	Частота [7, 28 дней - 1]. Размер группы [маленькая, большая]. Вероятность ложной тревоги (FAT) [0,01, 0,001].	Базовая инспекция состоит из физической инвентаризации баллонов в хранилище, проверки баланса массы, и анализа журнала изображений видеонаблюдения.
B. Пассивная проверка печати (pseals) <sup>2</sup>	Частота [7, 28 дней - 1]. Доля проверяемых печатей [0,5, 1,0].	Проверка целостности пассивных печатей для определения события вскрытия.
C. Неразрушающий контроль (nda) <sup>2</sup>	Частота [7, 28 дней - 1]. Вероятность ложной тревоги (FAT) [0,01, 0,001].	Гамма-спектроскопия для определения степени обогащения материала.
D. Разрушающий контроль (da) <sup>2</sup>	Частота [7, 28 дней - 1]. Количество образцов [1, 3].	Взятие образцов и отправка в лабораторию для высокоточного но занимающего много времени анализа для определения изотопного состава.
E. Анализ переданных видеоизображений	Размер группы [маленькая, большая].	Видеоизображения передаются дистанционно и автоматически просматриваются для обнаружения аномалий.
F. Активная проверка печати (aseals)	Доля опечатанных каскадов [0,5, 1,0].	Наложение активных печатей для автоматического оповещения при попытке взлома.
G. Непрерывный мониторинг обогащения (semo)	Вероятность ложной тревоги (FAT) [0,01, 0,001]. Длительность счета [300, 3600 с].	Непрерывный мониторинг обогащения в реальном времени световорного типа для обнаружения материала в каскаде с обогащением выше 20%.
H. Визуальная инспекция (DIV) <sup>3</sup>	Частота [7, 28 дней - 1].	Визуальная инспекция цеха каскадов для выявления аномалий (например, подозрительно расположенных баллонов или перезаполнения труб).
I. Сбор образцов окружающей среды (ES) <sup>3</sup>	Частота [7, 28 дней - 1]. Количество образцов [6, 12].	Взятие образцов в цехе каскадов и отправка в лабораторию для разрушающего анализа для определения изотопного состава.

<sup>1</sup> Базовая инспекция.

<sup>2</sup> "Дополнение" – может добавляться к базовой инспекции так часто, как проводится базовая инспекция.

<sup>3</sup> Инспекция в цехе каскадов – предоставляет инспектору доступ в цех каскадов.

## ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ВНЕШНИМИ ПРИЧИНАМИ

В дополнение к перечисленным выше гарантиям в модель включены бесплатные (для инспектора) внешние источники возможности обнаружения, использующие справочные вероятности обнаружения. Справочные вероятности обнаружения служат в качестве посредника для всех других гарантийных мероприятий и источников обнаружения, включая возросшие возможности обнаружения, которые предлагают разведывательные или открытые источники информации, вообще говоря, *без всяких расходов инспектора*. Справочные вероятности обнаружения представляют собой суточную вероятность и зависят от стратегии атакующей стороны. Их реализация предназначена для отображения реальности, в которой разведывательные или открытые источники информации лучше приспособлены для обнаружения определенных сценариев отвлечения или неправильного использования.

## РАСХОДЫ НА ГАРАНТИИ

Был сформулирован метод для выделения относительных расходов на каждое мероприятие по гарантиям. Эти расходы представляют собой оценки, основанные на доступной информации по необходимым потребностям в техническом оборудовании или рабочей силе. Используемые в модели значения расходов, названные "расчетными долларами" (s\$), базируются на оцениваемых реальных значениях стоимости выбранных гарантий, поделенных на 100. Например, единица оборудования стоимостью в 1000 долларов будет оцениваться в 10 расчетных долларов. Эта схема используется для удобства и подчеркивания того, что расходы сохраняют значение в относительном смысле, но не считаются достоверными реальными абсолютными расходами.

Расходы, связанные с каждым из гарантийных мероприятий, состоят из двух компонентов: капитальных расходов и расходов на эксплуатацию и обслуживание (O&M). Капитальные расходы амортизируются в течение эксплуатационно-пригодного срока службы оборудования. Имеются также одноразовые расходы, связанными с крупным оборудованием, таким, как масс-спектрометр. Расходы на эксплуатацию и обслуживание делятся на две категории: фиксированные и переменные. Фиксированные расходы на эксплуатацию и обслуживание связаны с поддержанием оборудования в исправности и не зависят от того, регулярно ли используется оборудование, или нет. Переменные расходы на эксплуатацию и обслуживание представляют собой расходы, которые оплачиваются обороняющейся стороной, когда она использует услугу, такую, как анализ образца, доступ к каналу слежения, или инспектирует предприятие. Расходы на отдельные позиции в некоторых гарантиях, такие, как стоимость печати, также рассматриваются как переменные расходы на эксплуатацию и обслуживание. Полные расходы на мероприятие гарантии равняются сумме ежегодных капитальных расходов на оборудование и фиксированных и переменных расходов на эксплуатацию и обслуживание.

Таблица 5. Сводка расходов на гарантии при обогащении.

Гарантийное Мероприятие	Капитальные расходы (s\$/год)	Фиксированные O&M (s\$/год)	Переменные O&M (s\$/год)		Общие фиксированные расходы (s\$/год)
			Рабочая сила	Прочие	
Инсп.-инвентариз.	0	0	10/инсп.	0	0
Инсп.-баланс масс	12	0,24	0	0	12,24
Инсп.-видеожурнал	16,50	1,65	0	0	18,15
Пассивные печати	0	0	2/инсп. 2,50/партию	0,01/печать	0
NDA	3,6	0,07	2/инсп.	0	3,67
DA	8,93	0,18	2/инсп.	0	9,11
Передача видео	32,50	3,25	0,60/день	0	35,75
Активные печати	0	0	0,60/день	0,01/печать	0
СЕМО	18	1,8	0,60/день	0	19,80
Визуальная инсп.	0	0	30/инсп.	0	0
ES	8,93	0,18	6/инсп. 2,50/партию	0	9,11

В таблице 5 показаны расходы, связанные с каждым гарантийным мероприятием. Подробное описание предположений, использованных при получении этих значений, приведено в Приложении С. Общие расходы на все возможные стратегии обороняющейся стороны в модели лежат в пределах от 0 до 5900 расчетных долларов.

## ВЫИГРЫШИ

Выигрыш обороняющейся и атакующей сторон для заданной пары стратегий представляет собой вероятность обнаружения с весовым коэффициентом количества и привлекательности полученного материала. Привлекательность материала оценивается с помощью метода показателя качества (FOM) Батке<sup>24</sup> для передового государства-распространителя, или для субнациональной группы независимо от исхода. Показатели качества для всех материалов, доступных атакующей стороне в моделировании обогащения, приведены ниже в таблице 6. Подробное описание методики расчета значений показателя качества можно найти в работе Бойера<sup>18</sup>. Значения показателя качества для природного урана и для урана, обогащенного до 4,5%, не могут быть рассчитаны, поскольку критическая масса для сферы из этих материалов без отражателя бесконечна; однако, этим материалам были присвоены такие значения, исходя из их привлекательности в сравнении с другой продукцией из обогащенного урана.

Таблица 6. Значения показателей качества для обогатительного предприятия.

Обогащение	Показатель качества
0,711%	0,033 <sup>1</sup>
4,5%	0,1
19,7%	0,991
50%	1,69
90%	2,15

<sup>1</sup>Аналогичное показателю качества значение 0,1 было присвоено материалу, обогащенному до 4,5%, и природному урану было присвоено значение 0,033 (одна треть от предыдущего значения) на основании того, что обогащение 1 кг природного урана до 90% требует примерно в три раза большей работы разделения, чем обогащение 1 кг урана от 4,5% до 90%.

Значение показателя качества FOM связывается с количеством материала Q (в кг) и вероятностью обнаружения DP с помощью функции выигрыша P, задаваемой следующим уравнением:

$$P = \frac{DP}{(FOM \cdot Q)^\alpha} \cdot \frac{1}{(1 + e - DP)} \cdot e \cdot (FOM_{y'} \cdot Q_{y'})^\alpha$$

Здесь  $\alpha$  – весовой коэффициент, который описывает степень, в которой атакующая сторона мотивируется материалом высокой ценности, или параметр "премиального материала". Параметр e обеспечивает, что для сценария с вероятностью обнаружения DP = 1 выигрыш становится очень большим, но остается конечным; ему присвоено значение 0,001. Функция выигрыша становится асимптотически большой по мере приближения вероятности обнаружения DP к единице, что нежелательно для атакующей стороны, которая стремится свести выигрыш к минимуму. Поэтому, несмотря на стремление атакующей стороны получить материал высокой ценности, она будет отвергать любую стратегию, которая приведет к предопределенному обнаружению, если будут доступны альтернативы. Выигрыш принимает максимальное значение в 1,0 в сценарии выхода из договора, означая, что выполняются два условия: (1) атакующая сторона получает наилучший возможный материал, и (2) вероятность обнаружения в сценарии равна единице. Запись  $(FOM_{y'} \cdot Q_{y'})^\alpha$  обозначает максимально возможную полезность материала для атакующей стороны. Выигрыш нормируется на максимально возможную полезность материала, доступную атакующей стороне, чтобы исключить искусственное уменьшение значения выигрыша при увеличении параметра  $\alpha$ .

## ОБРАЗЕЦ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИ

Здесь представлены три иллюстративных результата для демонстрации некоторых из возможностей модели: чувствительности стратегии обороняющейся и атакующей сторон к характеристикам атакующей стороны, эффективная граница и чувствительность стратегии обороняющейся стороны к обнаружению, определяемому внешними причинами. Первый результат показывает чувствительность стратегии обороняющейся и атакующей сторон к важности, которую атакующая сторона придает ценности материала. Для того, чтобы выполнить этот анализ, величина  $\alpha$ , входящая в приведенное выше уравнение, изменялась от 0 до 0,8, и были рассчитаны равновесные стратегии. Отметим, что случай  $\alpha = 0$  не является реалистичным сценарием, поскольку он соответствует одинаковой полезности всех материалов и количеств от природного урана до ВОУ;

однако,  $\alpha = 0$  служит в качестве предельного случая для экстремально консервативной атакующей стороны. Значения  $\alpha$  увеличиваются только до 0,8, потому что при таком значении атакующая сторона уже приходит к выбору стратегии одиночной атаки, которая определяется ее стремлением к материалу высокой ценности.

На рисунках 3 и 4 соответственно показаны стратегии атакующей и обороняющейся сторон в зависимости от  $\alpha$  для уровня бюджета  $B = 200$ . Числа, присвоенные каждой стратегии, являются уникальными идентификаторами стратегий обороняющейся стороны и стратегий атакующей стороны. Надпись рядом с числом указывает тип развернутого гарантийного мероприятия, или тип совершаемой атаки. Доля каждой играемой чистой стратегии показана на вертикальной оси. Чистая стратегия состоит только из одного варианта атакующей или обороняющейся стороны, в то время как смешанная стратегия включает в себя больше, чем один вариант. Она представляет собой рандомизацию чистых стратегий, из которых она состоит.

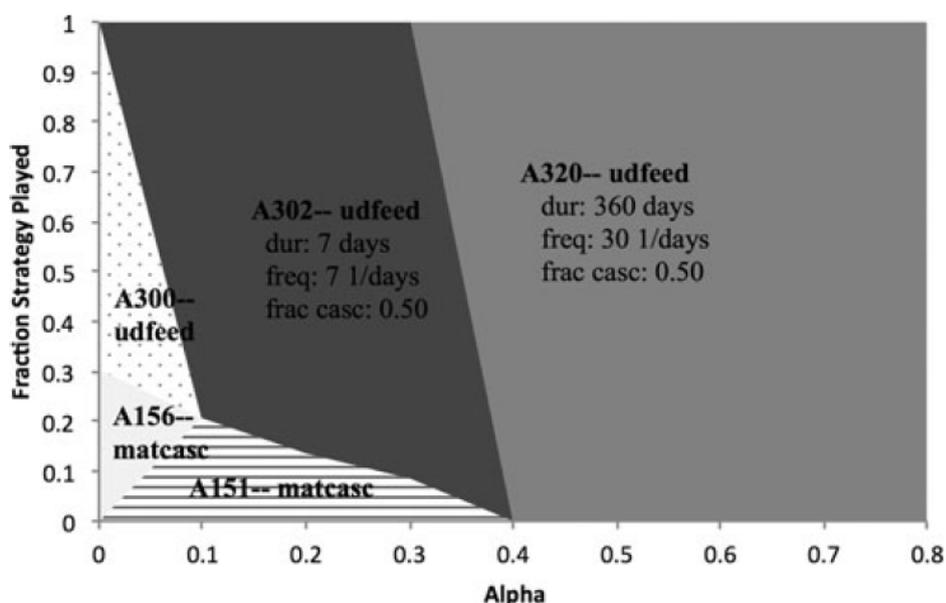


Рисунок 3. Стратегия атакующей стороны в зависимости от параметра  $\alpha$  ( $B = 200$ ). По горизонтальной оси отложен параметр  $\alpha$ ; по вертикальной оси – доля играемой стратегии.

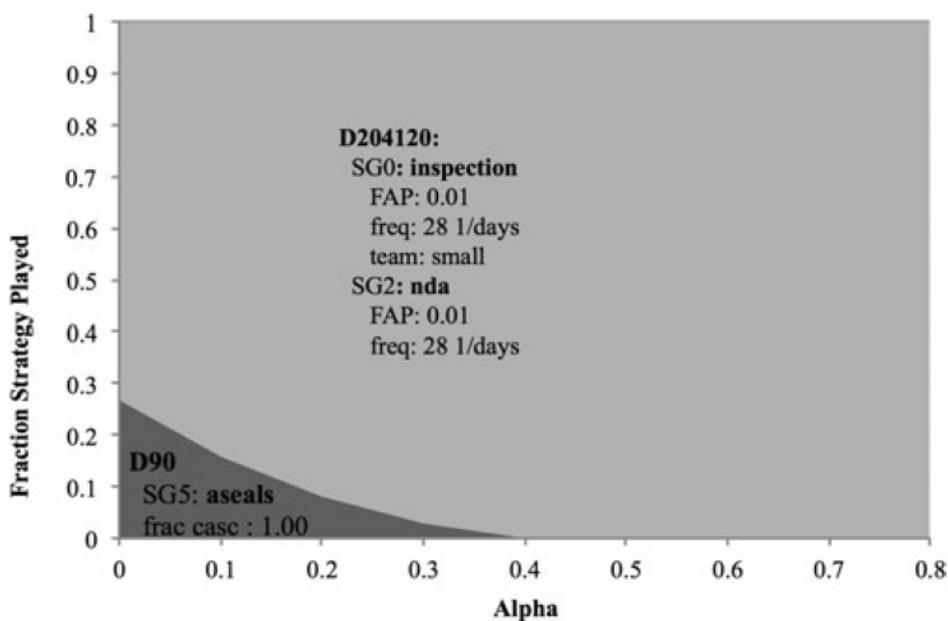


Рисунок 4. Стратегия обороняющейся стороны в зависимости от параметра  $\alpha$  ( $B = 200$ ). По горизонтальной оси отложен параметр  $\alpha$ ; по вертикальной оси – доля играемой стратегии.

В области малых  $\alpha$  как обороняющаяся, так и атакующая сторона играют смешанные равновесные стратегии. Здесь притягательность и количество материала не сильно влияют на выигрыш, так что атакующая сторона выбирает стратегию с относительно малым риском, которую трудно обнаружить, но которая приводит к небольшой ценности материала. Конкретно атакующая сторона играет смешанную стратегию производства необъявленной продукции из необъявленного сырья и крадет низко обогащенный уран прямо из каскада. Концептуально смешанная стратегия представляет собой рандомизацию вариантов стратегии; например, при  $\alpha = 0$  имеется 70%-ая вероятность того, что атакующая сторона будет производить необъявленную продукцию и 30%-ая вероятность того, что она будет красть материал прямо из каскада. Хотя это непосредственно и не ясно из рисунка, из описаний стратегии в таблице 7 можно увидеть, что стратегии, играемые атакующей стороной, по мере увеличения параметра  $\alpha$  становятся все более смелыми, и атакующая сторона становится все более заинтересованной ценностью и количеством материала. Например, обе стратегии A302 и A300 представляют собой атаки, продолжающиеся одну неделю, в которых атакующая сторона обрабатывает необъявленное сырье, но в стратегии A300 атакующая сторона обрабатывает необъявленное сырье только один раз в неделю, а для стратегии A302 атакующая сторона обрабатывает необъявленное сырье ежедневно. При  $\alpha = 0,4$  атакующая сторона достаточно мотивирована желанием получить большие количества материала для того, чтобы перейти к более агрессивной чистой стратегии обработки необъявленного сырья при ненулевой вероятности уклонения.

Таблица 7. Описания стратегий атакующей стороны.

Стратегия	Параметр 1	Параметр 2	Параметр 3	Параметр 4
A300 udfeed	dur = 7 дней	freq = 1/7 дней	fraction=0,0167	
A156 matcasc	dur = 7 дней	freq = 1/7 дней	fraction=0,0167	mass = 0,010 кг
A302 udfeed	dur = 7 дней	freq = 1/1 день	fraction=0,50	
A157 matcasc	dur = 7 дней	freq = 1/1 день	fraction=0,0167	mass = 0,100 кг
A276 recycle	dur = 360 дней	freq = 1/1 день	fraction=0,50	$x_p = 0,197$
A320 udfeed	dur = 360 дней	freq = 1/30 дней	fraction=0,50	

Рисунок 4 показывает, что обороняющаяся сторона также играет смешанную стратегию при малых значениях параметра  $\alpha$  и затем переключается на чистую стратегию. При  $\alpha = 0$  и  $\alpha = 0,1$  обороняющаяся сторона играет смешанную стратегию, включающую как активные печати (D90), так и инспекцию с неразрушающим контролем NDA (D204120). Смешанная стратегия снова представляет собой рандомизацию: обороняющаяся сторона 27% времени играет стратегию D90, что означает, что около четверти применяемых на предприятии активных печатей является реальными печатями, которые могут передавать информацию лицу, ожидающему доступа к сигналу тревоги, в то время как остальные три четверти печатей являются фиктивными. Атакующая сторона может видеть печати на каскадах, но не может отличить реальные печати от фиктивных. 73% времени обороняющаяся сторона играет стратегию инспекций, дополненных неразрушающим контролем (NDA), что означает, что обороняющаяся сторона случайным образом проводит только 73% разрешенных ей инспекций. Обороняющаяся сторона использует активные печати для подсчета материала, украденного из каскадов, и приобретает инспекции для обнаружения незаявленного сырья. С другой стороны, при больших значениях параметра  $\alpha$  атакующая сторона придает большее значение высокому качеству материала и придерживается чистой стратегии переработки незаявленного топлива. Тогда обороняющаяся сторона переходит к чистой стратегии одних инспекций, поскольку приобретение активным печатей больше не предоставляет никаких возможностей обнаружения.

Исследование чувствительности к параметру  $\alpha$  полезно для понимания результатов модели в контексте реальных ситуаций распространения. В реальности предпочтения и возможности противника (которые выражены его функцией полезности) не могут быть выяснены с любой степенью точности, так что результаты по чувствительности к параметру  $\alpha$  могут быть использованы для прояснения данной неопределенности. Исследование чувствительности к параметру  $\alpha$  может использоваться разными способами для того, чтобы получить информацию для процесса принятия решения: например, можно будет разместить распределение для отражения априорных представлений о функции полезности атакующей стороны или об ее возможностях. После этого модель можно будет запускать в стохастическом режиме, выполняя выборку из распределения по методу Монте-Карло, и определяя равновесие Нэша для создания портфеля возможных инвестиций обороняющейся стороны.

Рисунок 5 иллюстрирует "эффективную" границу выигрыша как функции бюджета при  $\alpha = 0,25$ . Пошаговое увеличение выигрыша при бюджетах в 500, 1000 и 2000 расчетных долларов соответствует изменениям в

стратегии обороняющейся стороны. Эти бюджеты выводят обороняющуюся сторону за порог расходов и позволяют ей приобретать некоторые выгодные симбиотические комбинации гарантий, которые приводят к росту возможности обнаружения. Например, при бюджете в 1500 s\$ обороняющаяся сторона играет чистую стратегию, которая включает ежемесячные инспекции большой группой, неразрушающий контроль, активные печати, и ежемесячные инспекции цеха каскадов (D226086). После того, как его бюджет увеличится до 1550 s\$, инспектор может позволить себе смешанную стратегию, предусматривающую рандомизацию между всеми перечисленными выше элементами и еженедельными (а не ежемесячными) инспекциями цеха каскадов (стратегия: 94% D1 [еженедельные инспекции цеха каскадов]; 6% D226086). Смешанная стратегия означает, что обороняющаяся сторона не будет приобретать инспекции цеха каскадов каждую неделю, но будет делать это в 94% недель<sup>25</sup>. Инспектирование с такой частотой будет достаточным для нее, чтобы сдерживать атакующую сторону от более опасной стратегии, которую она могла бы проводить, если бы не было никаких инспекций. Поскольку атакующая сторона играет смешанную стратегию, в основном состоящую из производства незаявленной продукции, смещение стратегии обороняющейся стороны к применению в основном еженедельных инспекций цеха каскадов увеличивает выигрыш инспектора, как это видно из графика, все еще удерживая атакующую сторону от перехода к другой мишени.

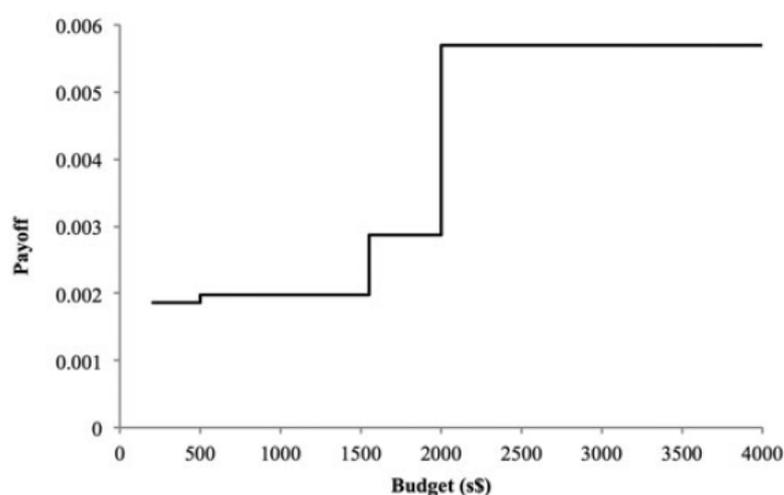


Рисунок 5. Выигрыш (по вертикальной оси) в зависимости от бюджета (по горизонтальной оси, в расчетных долларах).

Этот график важен, поскольку он может служить в качестве руководства для рационального принятия решений, представляющего информацию о том, когда дополнительные инвестиции приносят уменьшающиеся возвраты, как это происходит в области плато, где дополнительные инвестиции не приводят к росту выигрыша. Эффективная граница также иллюстрирует, когда от дополнительных инвестиций ожидают увеличения выигрыша, и на каком уровне следует инвестировать дополнительные ресурсы, чтобы повлиять на выигрыш.

Как отмечалось выше, суточная справочная вероятность обнаружения может быть применена в имитационной модели для того, чтобы служить заменой средств обнаружения, определяемых внешними причинами, которые не моделируются явным образом, включающих информацию от разведывательных и открытых источников, и обеспечивающих обороняющейся стороне дополнительную возможность обнаружения. Эти потоки данных для обороняющейся стороны могут быть либо бесплатными, либо виртуально бесплатными, если они предоставляются третьей стороной. Разведка может характеризовать неоднородностью обнаружения различных типов атак; поэтому справочная вероятность обнаружения неоднородно применяется к вариантам атакующей стороны. Для того, чтобы чувствительность равновесных стратегий к справочной вероятности обнаружения, справочная вероятность обнаружения необъявленной продукции систематически изменялась от 0,001 до 0,1, при этом наблюдались изменения в стратегии обороняющейся стороны. Справочная вероятность обнаружения для всех других стратегий полагалась равной нулю, и параметр  $\alpha$  полагался равным 0,25. Это испытание было разработано для отображения ситуации реального мира, в котором сбор разведывательной информации может оказаться способным обнаружить необычные перемещения баллонов на предприятии и из него, что может быть необходимо для производства необъявленной продукции из незаявленного сырья, даже не имея никаких сведений о том, что происходит на предприятии. На рисунке 6 показаны изменения в стратегии обороняющейся стороны в зависимости от справочной вероятности обнаружения для бюд-

жета В = 200.

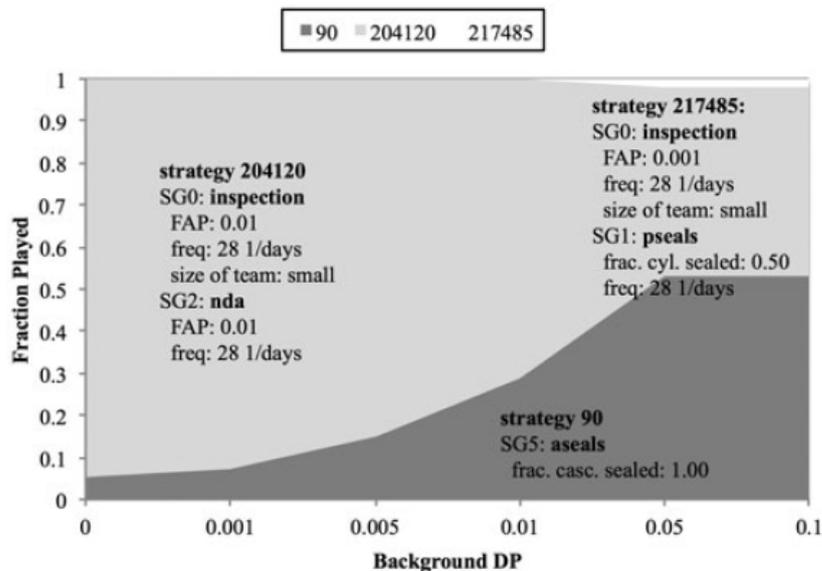


Рисунок 6. Стратегия обороняющейся стороны в зависимости от справочной вероятности обнаружения (по горизонтальной оси) для бюджета В = 200. На вертикальной оси показана доля играемой чистой стратегии.

Даже для такой низкой справочной вероятности обнаружения, как 0,1%, обороняющаяся сторона изменяет долю чистых стратегий, играемых в равновесной смешанной стратегии. При справочной вероятности обнаружения в 1% обороняющаяся сторона вносит небольшую долю новой чистой стратегии в свою равновесную смешанную стратегию. Это изменение в стратегии обороняющейся стороны происходит в ответ на ожидаемые изменения в стратегии атакующей стороны. С введением справочной вероятности обнаружения атакующая сторона начинает уходить от необъявленного производства из-за того, что оно является единственным вариантом атакующей стороны, к которой применима справочная вероятность обнаружения. Когда суточная справочная вероятность обнаружения повышается до 5%, атакующая сторона полностью прекращает необъявленное производство. Этот результат имеет серьезные последствия для выбора стратегий инспекции при низких бюджетах, поскольку оптимальная эффективная стратегия инспекции в отсутствие разведывательной информации не обязательно будет оптимальной эффективной стратегией инспекции при доступной разведывательной или открытой информации. Поэтому ограниченному в расходах инспектору следует рассматривать доступные надежные внешние источники обнаружения для того, чтобы применять оптимальную эффективную стратегию.

## ВЫВОДЫ И БУДУЩАЯ РАБОТА

Данная статья представляет новую методологию и ее вычислительную реализацию для применения теории игр для выделения гарантийной деятельности на предприятиях ядерного топливного цикла. Методология соединяет теоретико-игровую решающую программу с вероятностной имитационной моделью сценариев неправильного использования или отвлечения на обогатительном заводе GSEP. Игра вызывает имитационную модель для генерации значений выигрыша для заданных пар гарантий и стратегий атаки, и имитационная модель рассчитывает выигрыши, взвешивая вероятность обнаружения для пары по количеству и качеству полученного материала. Эти значения выигрыша возвращаются в игру и используются для заполнения матрицы выигрыша. Игра рассчитывается при помощи алгоритма фиктивной игры, и модель выводит равновесные стратегии обороняющейся и атакующей стороны, так же как и равновесное значение. Методология была разработана для того, чтобы разрешить пользователям вводить зависящие от предприятия предположения и алгоритмы вероятности обнаружения для генерации реалистичных результатов.

Результаты конкретного исследования показывают, что стратегии и оптимального распространения, и гарантий зависят от собственной оценки атакующей стороной материала, который она потенциально может получить, и от расширения возможностей государства, оказывая таким способом поддержку необходимости специфического для государства анализа нераспространения для принятия решений о стратегии гарантий.

Более того, хотя это и не представлено в настоящей статье, модель может также оптимизировать распределение ресурсов по нескольким предприятиям, иллюстрируя, в частности, доли полного бюджета, который обороняющаяся сторона может инвестировать в гарантии на отдельных предприятиях. Эти две возможности модели делают ее полезным средством для направления и поддержки внедрения МАГАТЭ концепции уровня государства и гарантий, направляемых информацией<sup>26</sup>. Этот инструмент предоставляет систематическую базу для выделения гарантийных ресурсов нескольким предприятиям в государстве с особыми характеристиками.

Одним из убедительных результатов, полученных в модели, является так называемая "эффективная граница", или визуальное представление выигрыша сценария в зависимости от бюджета. Эффективная граница отслеживает оптимально эффективную стратегию при любом бюджете, и служит в качестве руководства для принятия решения, предоставляя информацию о возврате обороняющейся стороной по инвестициям для решений по стратегиям гарантий. Хотя результаты подтверждают интуитивное мнение о том, что увеличение уровня ресурса инвестиций обороняющейся стороны увеличивают ее выигрыш, они также указывают на то, что существуют определенные условия, при которых дополнительные ресурсы обороняющейся стороны могут стать бесполезными. Одним из таких условий является желание выхода атакующей стороны из режима гарантий; другая возникает, когда обороняющаяся сторона инвестирует дополнительные ресурсы в области, в которых атакующая сторона уже сдерживается от атак.

Инструмент может также моделировать чувствительность стратегий обороняющейся стороны к внешним источникам вероятности обнаружения, которые бесплатны для нее, таким, как разведка, для информирования оптимальных гарантийных стратегий в присутствии такой информации.

Существенным потенциальным применением разработанной в этой статье модели является анализ предельных затрат, в особенности в области принятия решения по инвестициям на гарантии. Эта модель может быть использована для проведения анализа отношения стоимости к эффективности для нового типа инструментов или методов гарантий, посредством определения стоимости, после превышения которой обороняющаяся сторона больше не выбирает этот вариант, поскольку отношение вероятности обнаружения к стоимости становится слишком низким. Аналогичным способом модель может также предоставить оценку для "стоимости" разведывательной или открытой информации в окружении специфической угрозы.

Наконец, одним из наиболее насущных политических вопросов, связанных с государствами, которые могут, или не могут быть распространителями, нацелен на то, может ли государство быть сдержано от распространения, и если да, то какой ценой. В этой модели легко может быть реализован вариант легального поведения для того, чтобы установить количественное соответствие между характеристиками атакующей стороны и "бюджетом сдерживания", или уровнем инвестиций, требующимся обороняющейся стороне для того, чтобы принудить государство к лояльному поведению, или к открытому разрыву. Такой анализ предоставит политикам уникальную возможность увидеть, как инвестиции в гарантии повлияют, или не повлияют на решения, принимаемые государством для выполнения нелегальной оружейной программы.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Этот материал базируется на работе, поддерживаемой Министерством внутренней безопасности США по гранту 2012-DN-130-NF0001. Содержащиеся в данном документе взгляды и выводы принадлежат авторам, и не должны быть интерпретированы как представляющие официальную политику Министерства внутренней безопасности США, будь то явно выраженную, или подразумеваемую. Финансирование было получено также от фонда Стэнтона и Белферовского центра по научным и международным делам Гарвардской школы Кеннеди.

## ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. H.A. Elayat, H.E. Lambert and W.J. O'Connell, "Systems Analysis of Safeguards Effectiveness in a Uranium Conversion Facility" (paper presented at the 45th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Orlando, FL, 18-22 July 2004); H. Lambert, H. Elayat, W.J. O'Connell, L. Szytel, and M. Dreicer, "LISSAT Analysis of a Generic Centrifuge Enrichment Plant," (paper presented at the 48th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Tucson, AZ, (8-12, July 2007); and M. Yue, L. Cheng, and R. Bari, "A Markov Model Approach to Proliferation-Resistance Assessment of Nuclear Energy Systems," *Nuclear Technology*, 162 (2008): 26-44.
2. The National Academies. National Research Council. Review of the Department of Homeland Security's Approach to Risk Analysis (Washington: The National Academies Press, 2010).
3. Louis Anthony Cox, Jr., "Game Theory and Risk Analysis," *Risk Analysis*, 29,8 (2009): 106268,

- doi:10.1111/j.1539-6924.2009.01247.x.
4. Elayat et al., "Systems Analysis of Safeguards Effectiveness"; and H.A. Elayat, W.J. O'Connell, and B.D. Boyer, "Gas Centrifuge Enrichment Plant Safeguards System Modeling" (paper presented at the 47th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Nashville, TN, 16-20 July 2006).
  5. Yue et al., "Markov Model Approach." (ссылка 1)
  6. T. Bjornard et al., "Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems: an Overview" (paper presented at the International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, New Orleans, LA, 14-18 May 2006).
  7. J. Watson, *Strategy: An Introduction to Game Theory*, 2nd ed., (New York: W. W Norton & Company, 2008).
  8. R. Avenhaus and M.J. Canty, *Compliance Quantified: An Introduction to Data Verification*, (New York: Cambridge University Press, 1996).
  9. Department of Foreign Affairs and International Trade Non-Proliferation, Arms Control and Disarmament Division Canada, DM Kilgour and Rudolf Avenhaus, "The Optimal Distribution of IAEA Inspection Effort: Final Report," Ottawa, 1994.
  10. Равновесие Нэша в состязательной игре двух лиц – это состояние, в котором ни один из игроков не может улучшить свое положение, изменив свою стратегию, при условии, что каждому из игроков известна стратегия своего противника.
  11. G.G. Brown et al., "Interdicting a Nuclear-Weapons Project," *Operations Research*, 57, 4 (2009): 866-77.
  12. R. Elmore and W. Charlton, "Nuclear Nonproliferation Analysis Using Agent Based Modeling in an Entropy Empowered Intelligent Agent Bayesian Framework" (paper presented at 2014 Winter Simulation Conference, Savannah, GA, 7-10 Dec 2014); R. Elmore and W Charlton, "Dynamic Agent Based Modeling Using Bayesian Framework for Addressing Intelligence Adaptive Nuclear Nonproliferation Analysis" (PhD diss., Texas A&M University, 2014).
  13. George W. Brown, "Some Notes on Computation of Game Solutions," Rand Corporation (1949).
  14. A Washburn, "A New Kind of Fictitious Play," *Naval Research Logistics* 48 (2001): 270-80.
  15. Julia Robinson, "An Iterative Method of Solving a Game," *The Annals of Mathematics*, 54, 2 (1951), 296-301.
  16. F.A. Duran, "Probabilistic Basis and Assessment Methodology for Effectiveness of Protecting Nuclear Materials" (Ph.D. diss., The University of Texas at Austin, 2010).
  17. Чистая стратегия – это вариант, который всегда играет игрок, в отличие от смешанной стратегии, где игрок выбирает стратегию из распределения.
  18. BD Boyer, "Safeguards Approaches for Gas Centrifuge Enrichment Plants" Los Alamos National Laboratory, LA-UR-08-03736.
  19. R M Ward, "A Game Theoretic Approach to Nuclear Safeguards Selection and Optimization," (Ph.D. diss., The University of Texas at Austin, 2013).
  20. Предприятие такого размера способно производить приблизительно 57 существенных количеств обогащенного до 93% ВОУ, если вся его мощность будет выделена для такой задачи.
  21. Boyer, "Safeguards Approaches for Gas Centrifuge Enrichment Plants." (ссылка 18)
  22. На площадке обычно находится запас сырья на 75 суток работы; 84 используется здесь для упрощения вычислений (ровно три цикла инспекций). D.M. Gordon et al., "An Approach to IAEA Material- Balance Verification at the Portsmouth Gas Centrifuge Enrichment Plant," *Proceedings of the Fifth Annual Symposium on Safeguards and Nuclear Material Management*, 1983.
  23. C. Listner et al., "Quantifying Detection Probabilities for Proliferation Activities in Undeclared Facilities," (paper presented at Symposium on International Safeguards: Linking Strategy, Implementation and People, Vienna, Austria, 22-24 Oct 2014).
  24. C. Bathke, "The Attractiveness of Materials in Advanced Nuclear Fuel Cycles for Various Proliferation and Theft Scenarios," (presented at International Workshop for Users of Proliferation Assessment Tools, Texas A&M University, 2009).
  25. Отметим, что такая частота инспекций в цехе каскадов скорее всего непрактична даже для инспекторов-резидентов; широкий диапазон изменения частоты был разрешен здесь для демонстрации методологии.
  26. J. N Cooley, "Progress in Evolving the State-Level Concept," (presented at the Seventh INMM/ ESARDA Joint Workshop: Future Directions for Nuclear Safeguards and Verification, Aix-en-Provence, France, 2011); M. Whitaker, M. Laughter, and D. Lockwood, "Information-Driven Inspections," (presented at the 2010 IAEA Symposium on International Safeguards, Vienna, Austria, 1-5 Nov. 2010); Kory W Budlong Sylvester, Joseph F Pilat, and Chantell L Murphy, "Developing State-Level Approaches Under the State-Level Concept," (paper presented at Symposium on International Safeguards: Linking Strategy, Implementation and People, Vienna, Austria, 1 Oct 2014).