

## **ОБНАРУЖЕНИЕ ТАЙНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ НА БЛИЖНЕМ ВОСТОКЕ**

**Майкл Шеппнер**

### **АННОТАЦИЯ**

Дистанционный мониторинг криптона-85 от необъявленной переработки отработавшего ядерного топлива может быть частью договора о прекращении производства расщепляющихся материалов, может служить в качестве дополнительной меры для системы гарантий МАГАТЭ для мониторинга соблюдения Договора о нераспространении ядерного оружия, и может быть важным верификационным инструментом для моратория на переработку или для зоны, свободной от ядерного оружия, на Ближнем Востоке или в Восточной Азии. Для определения области, над которой все еще могут быть обнаружены выбросы криптона-85 от необъявленной деятельности различного уровня на Ближнем Востоке на высоком фоне криптона-85 от переработки в исторических программах ядерного оружия в Соединенных Штатах и СССР, так же как и от более недавней и продолжающейся коммерческой переработки во Франции и Великобритании, было применено моделирование переноса в атмосфере. Анализ годового ветрового потока над израильским предприятием в Димоне, единственной действующей площадкой переработки в регионе, позволяет предположить, что известный завод по переработке может отслеживаться с одной, или нескольких стационарных станций мониторинга. Случайные заборы проб воздуха для анализа криптона-85, возможно, с использованием беспилотных летательных аппаратов, могут быть пригодными для надежного и своевременного обнаружения тайных перерабатывающих заводов на фоне криптона-85, но для этого потребуется порядка 50-100 заборов воздуха в сутки. Окончание переработки в Ла Хаге во Франции и в Селлафилде в Великобритании и соответствующее уменьшение фона криптона-85 со временем позволит уменьшить примерно до 10 количество ежедневных заборов воздуха, требующихся для мониторинга Ближнего Востока.

Майкл Шеппнер работает в программе "Наука и всеобщая безопасность" Принстонского университета, Принстон, Нью-Джерси, США.

Почтовый адрес для корреспонденций: Michael Schoeppner, Program on Science and Global Security, 221 Nassau Street, 2nd Floor, Princeton, NJ 08540, USA.

Адрес электронной почты: schoeppner@princeton.edu

Статья получена 2 мая 2017 года и принята к публикации 30 октября 2017 года.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В зоне, свободной от ядерного оружия (ЗСЯО), запрещается разработка, производство, испытания, владение, размещение, или использование ядерного оружия в пределах обозначенной территории. Зона, свободная от ядерного оружия на Ближнем Востоке (БВЗСЯО) обсуждалась различными организациями и группами в течение десятков лет. Недавно эта идея снова привлекла внимание после заключения соглашения об ограничении ядерной программы Ирана<sup>1</sup>. Предложение Ирана и Египта 1974 года об установлении зоны, свободной от ядерного оружия, было одобрено в резолюции Генеральной ассамблеи Организации Объединенных Наций<sup>2</sup>. Кроме того, в докладе Управления по делам разоружения ООН в 1991 году было предложено, чтобы зона включала страны Лиги арабских государств, а также Иран и Израиль<sup>3</sup>. Все эти страны, за исключением Израиля, уже были сторонами Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО).

Выделение плутония посредством химической переработки отработавшего ядерного топлива

является одним из способов получения расщепляющегося материала для ядерного оружия. Переработка имеет также гражданские приложения, но пока ни одно из них не может быть экономически оправдано<sup>4</sup>. Поэтому новые перерабатывающие предприятия могут рассматриваться как индикаторы возможных тайных планов создания ядерного оружия. Региональный запрет на переработку может также стать частью Договора о прекращении производства расщепляющихся материалов. Необъявленное выделение плутония уже запрещено по Договору о нераспространении ядерного оружия. Способность подтверждать с высокой степенью уверенности отсутствие переработки является критичной для верификации региональной зоны, свободной от ядерного оружия, или регионального Договора о прекращении производства расщепляющихся материалов, а также существенно увеличит возможность верификации Договора о нераспространении ядерного оружия.

В каждом случае, верификация соблюдения является исключительно важной. Соблюдение может быть верифицировано совместными инспекциями, или вновь созданной региональной организацией в сотрудничестве с МАГАТЭ.

Как это было проанализировано в предыдущем исследовании<sup>5</sup>, перерабатывающие заводы выбрасывают криптон-85, инертный газ с периодом полураспада 10,76 года, который создается как продукт деления во время облучения ядерного топлива. Когда топливные стержни растворяются для извлечения плутония, криптон-85 высвобождается, включается в поток отходящего газа, и, в некоторый момент, выбрасывается в атмосферу. Результирующий выброс криптона-85 подвергается воздействию господствующего ветра и постепенно рассеивается, но его атмосферная концентрация остается обнаружимой до определенного расстояния по ветру<sup>6</sup>. В другом исследовании была продемонстрирована общая применимость определения концентрации атмосферного криптона-85 на основании измерений в направлении по ветру от гражданских перерабатывающих заводов<sup>7</sup>.

Ниже приводятся результаты анализа возможности обнаружения тайных перерабатывающих заводов на Ближнем Востоке по их выбросам криптона-85 для различных сценариев. Целью является определение количества и местоположений заборов образцов воздуха, требующихся для обеспечения своевременного обнаружения деятельности по переработке в регионе.

## **ПЕРЕРАБОТКА ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ПЛУТОНИЯ**

Плутоний чаще всего производят, отделяя его от облученного ядерного топлива с применением метода PUREX (Экстракция плутония и урана), заключающегося в растворении отработавшего ядерного топлива в азотной кислоте<sup>8</sup>. Плутоний извлекают из раствора в азотной кислоте с помощью легкого органического растворителя. Во время растворения стержней отработавшего топлива криптон-85 высвобождается и переходит в поток отходящих газов с предприятия.

Единственный известный перерабатывающий завод на Ближнем Востоке расположен в Израиле в пустыне Негев в Ядерном исследовательском центре около города Димона. Израиль признает существование центра, включая эксплуатацию тяжеловодного реактора, но заявляет, что он предназначен для ядерных исследований общего назначения, и не признает наличия подземного перерабатывающего завода. Предприятие в Димоне не находится под международными гарантиями. Исторически работающие на природном уране тяжеловодные реакторы и реакторы с графитовым замедлителем были первоначальными типами реакторов, использованных для производства плутония оружейного качества<sup>9</sup>.

Другим примером тайной ядерной деятельности в регионе был сирийский реактор на площадке Аль Кибар, уничтоженный израильской бомбардировкой в 2007 году. Как утверждали, эта установка была предназначена для военных целей, в том числе для производства плутония, что было подтверждено МАГАТЭ в мае 2011 года<sup>10</sup>.

Тайным программам переработки нужен источник плутония. Поскольку плутоний образуется при поглощении нейтронов ураном, в качестве такого источника может быть использовано облученное ядерное топливо от местного реактора. Однако, облученный уран может быть также импортирован через границу страны, например, в форме отработавшего ядерного топлива. Следовательно, наличие не поставленных под гарантии реакторов может быть индикатором тайной программы переработки, но не является необходимым условием для нее.

Создание перерабатывающих предприятий промышленного масштаба, на которых выделяются тонны плутония в год, потребует нескольких лет планирования, ввода в строй и испытаний для удовлетворения требований современных регулятивных стандартов. Однако, утверждалось, что существующее предприятие другого типа (например, молочный, винный или нефтеперерабатывающий завод) может быть

в течение года перестроен в "быстрый и простой" перерабатывающий завод для производства количества плутония, достаточного для изготовления нескольких бомб<sup>11</sup>. По сравнению со специализированным промышленным предприятием, как показал опыт стран, обладающих ядерным оружием, и Японии, такие предприятия могут столкнуться с проблемами безопасности и радиационной защиты, но, несмотря на это, на них могут быть произведены пригодные для создания оружия количества плутония.

МАГАТЭ определяет существенное количество (SQ) ядерного материала как "приблизительное количество ядерного материала, в отношении которого [...] возможность изготовления ядерного взрывного устройства не может быть исключена"<sup>12</sup>. Для плутония-239 этот порог устанавливается как 8 кг для ядерного устройства первого поколения, включая потери в течение изготовления. Упомянутый выше простой и быстрый перерабатывающий завод, способный перерабатывать 50 тонн тяжелого металла из реактора на легкой воде, за год<sup>13</sup> может выделить количество плутония-239, достаточное для изготовления примерно одной бомбы за неделю<sup>14</sup>.

## **ДИСТАНЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ЗАВОДОВ**

Количество криптона-85, присутствующее в отработавшем топливе, зависит от типа топлива, длительности облучения, и времени хранения до переработки. В предыдущих исследованиях было показано, что минимальное содержание криптона-85 при допущении его распада в отработавшем топливе составляет примерно  $1,6E+13$  Бк на килограмм плутония оружейного качества<sup>15</sup>. Это означает, что для существенного количества плутония, т.е. 8 кг, в систему отходящих газов предприятия из свежего отработавшего топлива попадет примерно  $1,28E+14$  Бк криптона-85. Деятельность по переработке сопровождается образованием газообразных отходов. Извлечение криптона-85 из газового потока и удержание его на предприятии технически возможно, но сложно и дорого. Потенциальные методы, такие, как криогенная дистилляция, поглощение фторуглеродными соединениями, поглощение углекислым газом и селективная физическая адсорбция, были продемонстрированы в лабораторных масштабах, и они позволяют захватывать 99% криптона, или более<sup>16</sup>. Однако, учитывая требуемый уровень технического опыта и отсутствие предыдущей реализации таких методов, в последующих сценариях предполагается, что весь криптон-85 из "быстрого и простого" тайного перерабатывающего предприятия будет выбрасываться в атмосферу.

Концентрация криптона-85 в атмосфере возросла с тех пор, когда в 1945 году началась переработка в промышленном масштабе. После эффективного перемешивания с глобальными воздушными массами в течение десятилетий, исторические выбросы привели к базовому уровню концентрации во всем мире. В 2010 году базовый уровень составлял  $1,36$  Бк/м<sup>3</sup> в северном полушарии и  $1,30$  Бк/м<sup>3</sup> в южном полушарии<sup>17</sup>. Концентрация в северном полушарии была больше из-за того, что все крупные перерабатывающие предприятия были построены в северном полушарии, а перемешивание через экватор было довольно медленным.

Сами по себе превышения концентрации криптона-85 над базовым уровнем еще не указывают на тайную деятельность по переработке. Более высокие концентрации могут быть связаны с работой известных предприятий, таких, как Ла Хаг во Франции и Селлафилд в Великобритании, которые ответственны за более, чем 90% общемировых выбросов криптона-85. В любом анализе следует учитывать подветренное влияние на выбросы криптона-85 от известных промышленных перерабатывающих заводов.

## **Страны, подлежащие мониторингу**

Предполагаемый регион для зоны, свободной от ядерного оружия, на Ближнем Востоке, показанный на рис.1, включает в себя 24 страны с общей площадью 15,1 миллиона квадратных километров. Десять из этих стран в предполагаемом регионе проводят, или проводили, ядерные программы, или заявляли о своих ядерных амбициях: Алжир, Египет, Иран, Ирак, Израиль, Иордания, Ливия, Саудовская Аравия, Сирия, и Объединенные Арабские Эмираты (смотрите таблицу 1); общая площадь этих стран равна 9,8 миллиона квадратных километров. Однако, большинство исследовательских реакторов, перечисленных в таблице 1, не способны производить значительные годовые количества плутония<sup>18</sup>. Все эти страны, за исключением Израиля, подписали Договор о нераспространении ядерного оружия, что означает, что все их действующие, или строящиеся реакторы, а также отработавшее ядерное топливо, находятся под гарантиями.



**Рисунок 1.** Региональная картина. Серым цветом выделены страны, которые предполагается включить в зону, свободную от ядерного оружия, на Ближнем Востоке, причем темно-серым цветом отмечены страны, имеющие ядерные установки или амбиции, а светло-серым цветом – страны, не имеющие таковых.

**Таблица 1.** Прошлые, существующие и планируемые ядерные программы в странах Ближнего Востока<sup>32</sup>.

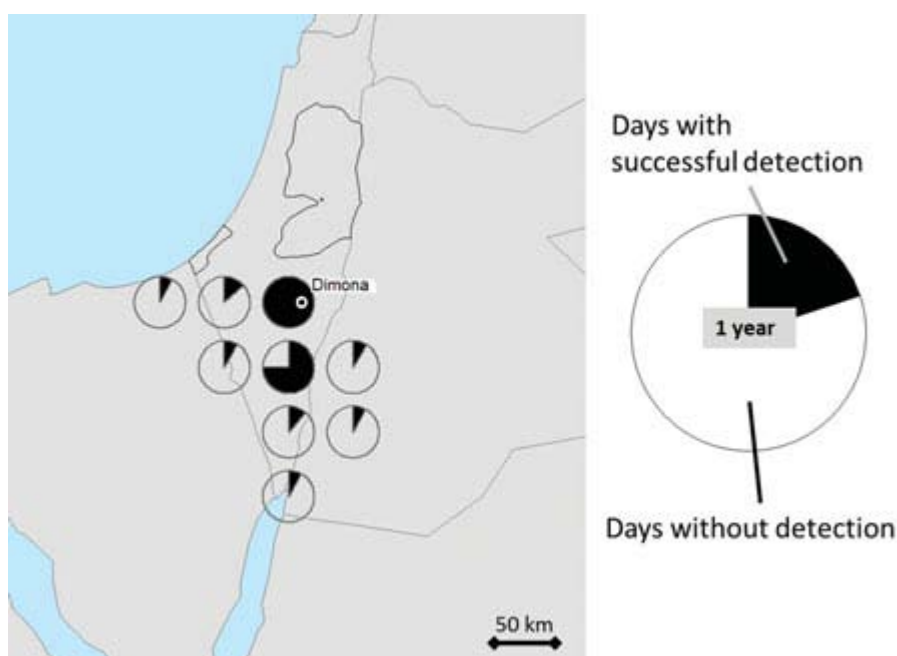
Страна	Ядерная программа
Алжир	Два исследовательских реактора, месторождения урана
Египет	Два исследовательских реактора, планы приобретения энергетических ядерных реакторов
Иран	Исследовательские и энергетические реакторы, урановые рудники и обогатительные фабрики
Ирак	Прекращенная программа ядерного оружия
Израиль	Тяжеловодный реактор, перерабатывающее предприятие, ядерное оружие
Иордания	Исследовательский реактор, планы гражданской программы ядерной энергетики
Ливия	Исследовательский реактор, прекращенная программа ядерного оружия
Саудовская Аравия	Планы гражданской программы ядерной энергетики
Сирия	Реактор в Аль Кибаре (разрушен), реактор с миниатюрным источником нейтронов
Объединенные Арабские Эмираты	Строятся четыре энергетических ядерных реактора

В данной статье обсуждается возможность обнаружения перерабатывающих предприятий в четырех сценариях, в каждом из двух региональных вариантов. В первом случае в анализ включаются все страны, предлагаемые для включения в зону, свободную от ядерного оружия, на Ближнем Востоке. Во втором региональном варианте, в котором доступны только ограниченные ресурсы, рассматриваются только страны с существующими или планируемыми ядерными программами.

В целом, задача обнаружения тайной деятельности по переработке может быть разделена на обнаружение неизвестных предприятий и на мониторинг известных предприятий.

## МОНИТОРИНГ ИЗВЕСТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Поскольку предприятие в Димоне является единственным известным перерабатывающим заводом в регионе, то оно используется здесь как конкретный случай для дистанционного мониторинга известного предприятия. Тем не менее, последующий анализ может быть применен также и к другим площадкам, представляющим особый интерес. Предполагается, что на заводе в Димоне разделяется около 18 кг плутония в год<sup>19</sup>. Это приведет к ежегодному выбросу в по крайней мере  $2,9E+14$  Бк криптона-85<sup>20</sup>. Были проведены предсказывающие моделирования размытия факела для выбросов такой средней интенсивности для того, чтобы показать возможность детектирования над уровнем фона в подветренном направлении от Димоны. Моделирования проводились по лагранжевой модели распределения частиц Flexpart 8.23<sup>21</sup> и историческим метеорологическим данным Глобальной системы предсказания (GFS) с пространственным разрешением  $0,5^\circ$ , предоставленным Национальными центрами предсказания состояния окружающей среды (NCEP)<sup>22</sup>. Для каждого дня 2010 года выброс, произошедший в Димоне, моделировался в течение 7 суток. Доля дней, в которые выбросы из Димоны будут наблюдаемыми над уровнем фона в расположениях с подветренной стороны, показана на рисунке 2. В этом исследовании для того, чтобы быть засчитанным как наблюдаемая, общая концентрация криптона-85 в моделировании, должна превышать два комбинированных стандартных отклонения от неопределенности детектора и флуктуаций фона, вызванных другими перерабатывающими предприятиями.



**Рисунок 2.** Димона и вероятности обнаружения повышенной концентрации криптона-85 в предположении непрерывной работы с выделением примерно 18 кг плутония в год. На карте показаны возможные расположения стационарных станций мониторинга на сетке с шагом 50 км. Наиболее часто ветер направлен на юго-юго-восток и запад-юго-запад. Черным цветом выделены дни с успешным обнаружением, белым цветом – дни без обнаружения.

Как показано на рисунке 2, предприятие не обязательно окружать станциями мониторинга со всех сторон. Станция в подветренном направлении на расстоянии нескольких километров от предприятия (с таким же размером сетки, что на карте) обеспечит наиболее частое покрытие. Поскольку способность к обнаружению уменьшается с расстоянием, станцию следует размещать так близко к предприятию, как это возможно. В тех случаях, когда станции приходится размещать дальше, выбор их расположения в соответствии с местной розой ветров позволит увеличить вероятность обнаружения. Используя Димону в качестве примера, можно показать, что размещение двух или трех станций по наиболее вероятным направлениям ветра будет достаточным для почти постоянного мониторинга.

Каждое предприятие будет обладать специальным распределением ветров, которое, если его правильно использовать, может минимизировать количество необходимых станций мониторинга и

максимизировать вероятность обнаружения выбросов криптона-85. Несколько станций могут практически перекрыть все возможные подветренные направления для того, чтобы противодействовать рассчитанным по времени выбросам, предназначенным для затруднения обнаружения. Будет крайне маловероятно, что нарушитель сможет так запланировать процесс переработки и сброса остаточных газов, чтобы дожидаться необычной картины ветров, и избежать обнаружения стационарными станциями мониторинга.

Группированные выбросы из предприятия в Димоне приведут к увеличению вероятности обнаружения – но, естественно только в промежутках времени после дней выбросов криптона-85. Однако, если система удержания криптона будет успешно реализована на предприятии такого размера, то методы дистанционного забора образцов не смогут обнаружить необычно высокие концентрации криптона-85, и нужно будет уменьшить расстояние до предприятия, или применять мониторинг накопления выбросов. В текущей научной литературе не имеется упоминаний о существовании системы удержания криптона вне пределов лабораторного применения<sup>23</sup>.

## **ОБНАРУЖЕНИЕ ТАЙНЫХ ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Для определения возможности обнаружения действующего тайного перерабатывающего предприятия в этом регионе выбросы криптона-85 из нескольких гипотетических предприятий отслеживались с помощью моделирования атмосферного переноса. Шестнадцать воображаемых местоположений были распределены по Ближнему Востоку для того, чтобы перекрыть все регионы и различные метеорологические условия (см. рисунок 3). Параметры, определяющие возможность обнаружения, обсуждаются в последующих подразделах.

### **Профили выбросов**

Скорости выброса криптона-85 базируются на трех различных скоростях переработки. Факелы и возможность их обнаружения моделировались для 1 существенного количества в неделю, в месяц и в год, для того чтобы представить операции различного масштаба. Следует отметить, что одно существенное количество в неделю, и даже одно существенное количество в месяц следует рассматривать как довольно большие программы переработки, если они будут поддерживаться в течение значительного времени<sup>24</sup>.

Газообразные отходы промышленных предприятий обычно высвобождаются в групповых выбросах. Кроме того, выбросы из перерабатывающего завода могут принимать различные формы в зависимости от выработки отработавшего топлива, конструкции системы выделения отходящих газов, и плана-графика эксплуатации. Для анализа различных схем выброса, которые могут быть выбраны нарушителем, в моделировании рассматривались два профиля выбросов. В первом выбросы предполагались постоянными во времени. Во втором выбросы выпускались как группа только один раз в неделю. Картина выбросов с тайного предприятия может располагаться между двумя этими вариантами. В последующих расчетах возможности обнаружения рассматриваются оба указанных профиля.

### **Сценарии фоновой концентрации**

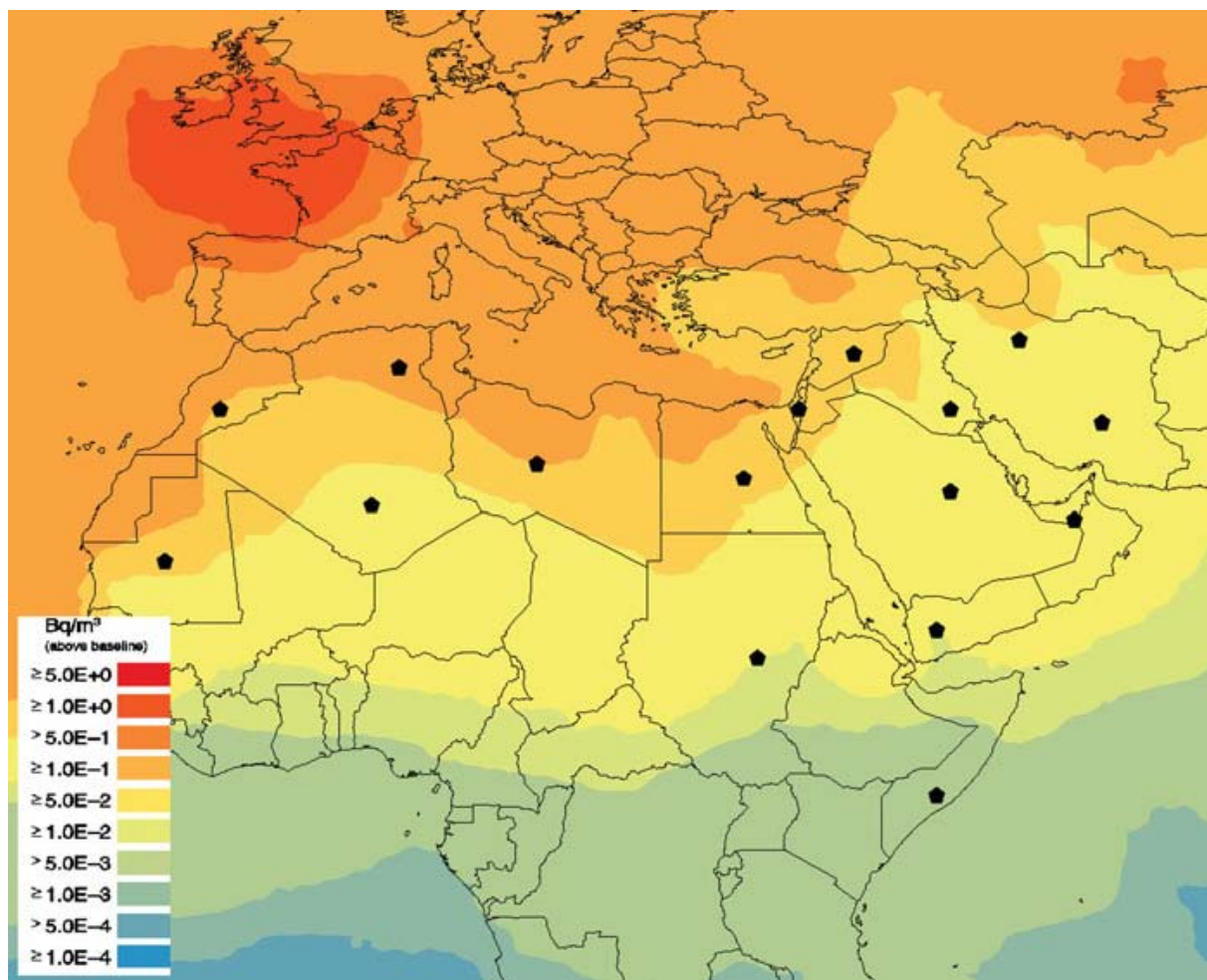
В анализе рассматриваются различные сценарии фоновой концентрации. Сегодняшний фон концентрации состоит из двух компонентов: почти однородной базовой линии из-за долговременного накопления криптона-85 в атмосфере, и краткосрочного увеличения из-за недавних выбросов из активных промышленных перерабатывающих предприятий. Если выбросы от объявленных предприятий будут остановлены либо благодаря общему отказу от переработки, либо удержанию криптона-85, то кратковременные пики концентрации из-за блуждающих факелов от промышленных предприятий исчезнут в течение нескольких суток, а базовый уровень начнет уменьшаться с полупериодом в 10,76 лет.

Ниже будут рассмотрены четыре сценария для фона криптона-85: современный базовый уровень с современными выбросами<sup>25</sup>; и современный базовый уровень без флуктуаций, как если бы объявленная переработка только что закончилась, через 10 лет после прекращения, и через 30 лет после него.

### **Моделирование выбросов из тайных предприятий**

Для каждого местоположения выброшенный факел криптона-85 отслеживался в течение 10 суток транспортного времени после выброса<sup>26</sup>. Моделирование эмиссии проводилось для ежесуточных

выбросов на протяжении одного года, так, что могли быть включены сезонные эффекты. Так же, как для всех ранее проведенных вариантов моделирования, для этих расчетов использовалась модель дисперсии частиц Flexpart и метеорологические данные с пространственным разрешением  $0,5^\circ$ , предоставленные Национальными центрами предсказания состояния окружающей среды (NCEP)<sup>27</sup>. Выходные концентрации являются репрезентативными для воздуха внутри планетарного пограничного слоя, высота которого может меняться от нескольких сотен метров до двух километров в зависимости от метеорологических условий и времени суток.



**Рисунок 3.** Одно стандартное отклонение концентрации криптона-85 в атмосфере над уровнем фона  $1,36 \text{ Бк/м}^3$ . Самым мощным и самым близким является перерабатывающий завод в Ла Хаге. Недавние выбросы из завода в Ла Хаге ответственны за большую часть флуктуаций фона. Другими известными источниками в Европе и на Ближнем Востоке являются Селлафилд в Великобритании и Димона в Израиле, последний из которых не будет активным в зоне, свободной от ядерного оружия, на Ближнем Востоке. Черными маркерами отмечены местоположения различных моделируемых эмиссий из гипотетических перерабатывающих заводов. Эти местоположения используются для определения средней чувствительности детектирования предполагаемого тайного перерабатывающего предприятия на Ближнем Востоке.

Для каждого из 16 местоположений была рассчитана дисперсия предполагаемых эмиссий для 2010 года и были сохранены ежесуточные моментальные снимки факелов. На основании этих ежесуточных моментальных снимков для каждого местоположения и для каждого дня была определена область возможности обнаружения. Рассматриваемые сценарии перечислены в Таблице 2.

**Таблица 2.** Обзор сценариев. Два различных набора стран, которые могут отслеживаться в зоне, свободной от ядерного оружия, на Ближнем Востоке; три различных объема производства плутония для охвата различных масштабов операций; два профиля эмиссий для учета наиболее различающихся способов группирования выбросов; четыре сценария фона, включающих современные и будущие уровни фона.

Регионы	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Лига арабских государств, Израиль и Иран (24 страны, 15,1 миллионов квадратных километров)</li> <li>• Страны с ядерными программами или планами (10 стран, 9,8 миллионов квадратных километров)</li> </ul>
Положение выбросов	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 16 гипотетических местоположений</li> </ul>
Объемы выделения плутония (1 СК = 1 существенное количество = 8 кг плутония)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 СК в неделю</li> <li>• 1 СК в месяц</li> <li>• 1 СК в год</li> </ul>
Профили эмиссии	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Непрерывная</li> <li>• Один день в неделю</li> </ul>
Сценарии фона	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Современная базовая линия и флуктуации</li> <li>• Современная базовая линия без флуктуаций</li> <li>• 10 лет после объявления о прекращении переработки</li> <li>• 30 лет после объявления о прекращении переработки</li> </ul>

### Случайные выборки и порог обнаружения

Из предыдущих исследований<sup>28</sup> стало ясно, что современный атмосферный фон криптона-85 слишком велик для того, чтобы проводить отбор образцов окружающей среды в большом регионе на базе стационарных станций мониторинга, поскольку необходимая плотная сеть станций мониторинга будет неприемлемо дорогой. Поэтому в данной статье рассматривается режим мониторинга, основанный на мобильном отборе образцов в нижней атмосфере на высоте до нескольких сотен метров. В этом сценарии определенное количество образцов воздуха за день будет забираться в случайно выбранных местоположениях в области мониторинга. Затем образцы воздуха будут доставляться в одну, или, может быть, несколько региональных лабораторий, где будет проводиться измерение концентрации криптона-85 в этих образцах. Типичные объемы воздуха в современных процедурах составляют примерно 10 кубометров<sup>29</sup>, но они могут быть сжаты для удобства транспортировки. Детекторы криптона-85 следующего поколения на базе магнитооптических газовых ловушек могут понизить требуемый объем образца до примерно 1 литр<sup>30</sup>, что будет способствовать дальнейшему упрощению забора и транспортировки образцов.

Ожидается, что любой образец будет содержать базовую концентрацию криптона-85. Повышенную концентрацию можно объяснить случайными ошибками измерений, выбросами от объявленных предприятий, или выбросами от тайных предприятий. Принимается, что неточность измерений будет составлять 3 %. На основании эмиссии от объявленных предприятий для каждого местоположения при помощи моделирования атмосферного переноса было рассчитано стандартное отклонение атмосферной концентрации криптона-85 (смотрите рисунок 3). Картины выбросов известных перерабатывающих заводов опубликованы не были. Поэтому для расчета фоновых флуктуаций в качестве общего критерия обнаружения предполагалось, что выбросы в течение года будут постоянными.

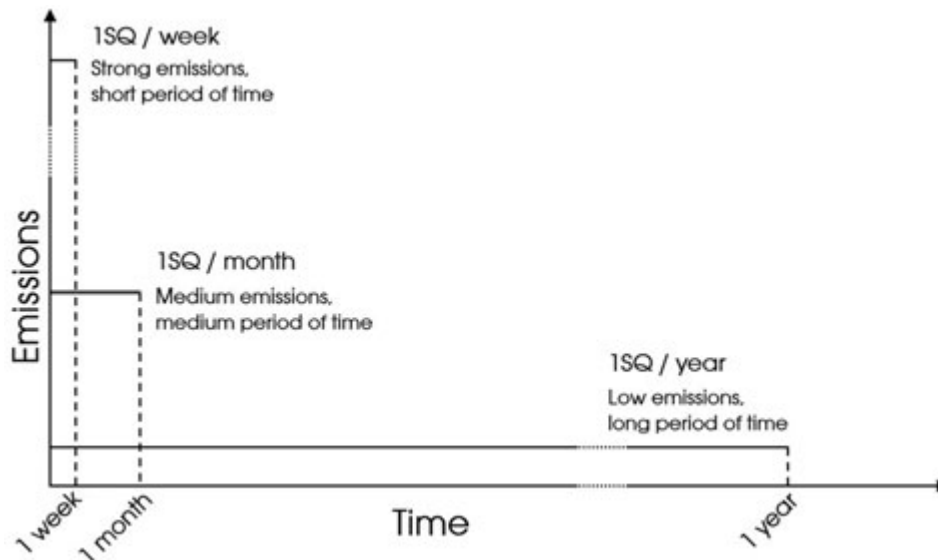
Моделирование атмосферного переноса было применено к расчету характеристик факелов криптона-85 для шестнадцати гипотетических местоположений на Ближнем Востоке. Была рассчитана область, в которой каждый факел приведет к обнаруживаемой концентрации, возвышающейся на фон. В этом исследовании "возвышающийся" определяется как превышающий два стандартных отклонения комбинированных неопределенности детектора и флуктуаций от расположенных против ветра объявленных предприятий. Результирующий след представляет собой размер области, в которой образцы воздуха приведут к успешному обнаружению криптона-85, тайное перерабатывающее предприятие если будет активным. Для расчета общей вероятности обнаружения одного тайного предприятия в большей области, эти следы будут усредняться в течение одного года для всех шестнадцати местоположений. Размер следа зависит не только от метеорологических условий, но также и от предполагаемых профилей эмиссии (постоянных или групповых), общего объема переработки и фоновых условий, для которых



рассматривались все комбинации. Для различных местоположений может проявляться вариация размеров следа от среднего до двух раз в обоих направлениях.

### Своевременность обнаружения

Тайное предприятие с медленным выделением плутония будет приводить к небольшому следу, в котором криптон-85 может быть измерен над уровнем фона. Тем не менее, обнаружение такого предприятия не является таким же срочным, как у предприятия с большим выходом плутония. Предполагается, что целью обнаружения будет обнаружение тайного перерабатывающего завода в течение времени, необходимого для производства одного существенного количества плутония. Временные мерки и уровни эмиссии для трех различных скоростей переработки иллюстрируются на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Качественные временные мерки и уровни эмиссии для различных скоростей разделения плутония. Производство одного существенного количества плутония (8 кг) создает по крайней мере  $1,28E+14$  Бк криптона-85. Уровень эмиссии и длительность эмиссии зависят от скорости производства плутония. Высокая скорость производства плутония оставляет большой след, который легче обнаружить, но оставляет меньше времени для обнаружения перед тем, как будет произведено одно существенное количество плутония. Соответственно, низкую скорость производства плутония будет более трудно обнаружить из-за более низкой эмиссии, но она оставляет больше времени для обнаружения перед тем, как будет произведено одно существенное количество плутония.

### Расчет возможности обнаружения

После того, как определен средний след для возможности обнаружения тайного перерабатывающего завода, может быть рассчитана вероятность  $p$  взятия образца воздуха с превышением концентрации криптона-85 на два стандартных отклонения в области размера  $A$ . Когда будут взяты  $n$  образцов в случайных местоположениях на большой области  $A$  вероятность  $p$  взятия по крайней мере одного такого образца из подобласти  $a$  будет равна:

$$p = 1 - \left(1 - \frac{a}{A}\right)^n$$

Когда производится забор образцов в течение нескольких дней  $d$  в случайных местоположениях внутри области  $A$ , общая вероятность по крайней мере одного успешного обнаружения  $P$  рассчитывается по формуле:

$$P = 1 - (1 - p)^d$$

При предположении определенной вероятности обнаружения  $P$ , количество образцов, собираемых за один день,  $n$ , в течение нескольких дней  $d$ , может быть рассчитано по формуле:

$$n = \frac{\ln(1 - P)}{d \cdot \ln\left(1 - \frac{a}{A}\right)}$$

В последующем для расчета требуемого количества образцов предполагается, что желательная вероятность обнаружения  $P = 90\%$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В этом разделе представлены количества случайных заборов образцов за сутки, необходимых для достижения 90% вероятности обнаружения гипотетических тайных перерабатывающих заводов на Ближнем Востоке. Как указывалось выше, рассматриваются две различных региональных области на Ближнем Востоке.

**Таблица 3.** Количество заборов образцов за сутки в случайных местоположениях во всех странах Ближнего Востока, необходимые для обеспечения 90% вероятности обнаружения тайных перерабатывающих заводов. Результаты для непрерывных выбросов и для групповых выбросов в один день в неделю обычно довольно близки с неопределенностью до 5%; диапазон значений приводится только тогда, когда разница существенно выше. Диапазоны для низких скоростей переработки для большинства сценариев фона намного шире, и большие значения соответствуют непрерывным низким выбросам, быстро рассеивающимся до фоновых значений, а меньшие значения соответствуют групповым выбросам, которые легче обнаружить. 1 СК = 1 существенному количеству = 8 кг плутония.

Скорость разделения плутония	1 СК/год	1 СК/месяц	1 СК/сутки
Своевременное обнаружение за	365 дней	30 дней	7 дней
Современный фон и активные выбросы	85 - 310	90	92
Современный фон без выбросов	60 - 190	72	75
Фон через 10 лет после конца выбросов	33 - 45	38	36
Фон через 30 лет после конца выбросов	9	9	8

Если все страны-участницы зоны, свободной от ядерного оружия, на Ближнем Востоке, будут наблюдаться в равной степени, то должна будет покрыта площадь в 15,1 миллиона квадратных километров. В таблице 3 перечислены количества образцов, которые должны быть собраны за сутки в случайных местоположениях на данной площади для того, чтобы обеспечить 90% вероятность обнаружения тайных перерабатывающих предприятий. С современной базовой фоновой концентрацией и флуктуациями от объявленных перерабатывающих заводов потребуется собирать менее 100 образцов за сутки для обнаружения крупномасштабной и среднемасштабной переработки в течение времени, требуемого для выделения одного существенного количества плутония. Профиль эмиссии, как это обсуждалось ранее, не будет оказывать большого влияния на возможность обнаружения этих скоростей переработки; результаты будут изменяться только в пределах 5%. Однако, для обнаружения маломасштабной переработки может потребоваться от 85 до 310 образцов, в зависимости от профиля эмиссии. Когда малые и постоянные выбросы рассеются в фоне, они быстро станут не обнаружимыми даже на относительно малом расстоянии, что затруднит обнаружение и потребует больше случайных образцов. С другой стороны, если при той же самой маломасштабной переработке выбросы будут высвобождаться группами один раз в неделю, то факелы будут оставаться обнаружимыми над уровнем фона на большей площади и вероятность обнаружения будет сравнима со случаем более высоких скоростей переработки. Те же самые соображения объясняют диапазон от 60 до 190 образцов в день для низкой скорости переработки при современном уровне фона без флуктуаций, в то время как более высокие уровни переработки будут обнаружимыми при примерно 80 образцах в сутки без зависимости от профиля эмиссии. Однако, если в будущем сценарии, когда объявленная переработка будет остановлена

и фоновый уровень будет понижаться в течение 10 или 30 лет, количества требующихся образцов за сутки уменьшатся аналогичным образом до 40 и 10 соответственно.

**Таблица 4.** Количества заборов случайных образцов за сутки в странах Ближнего Востока с имеющимися ядерными программами или планами, необходимые для обеспечения 90% вероятности обнаружения тайных перерабатывающих заводов. Результаты усредняются для гипотетических местоположений только в наблюдаемых странах. Результаты для непрерывных выбросов и для групповых выбросов в один день в неделю обычно довольно близки с неопределенностью до 5%; диапазон значений приводится только тогда, когда разница существенно выше. Диапазоны для низких скоростей переработки для большинства сценариев фона намного шире, и большие значения соответствуют непрерывным низким выбросам, быстро рассеивающимся до фоновых значений, а меньшие значения соответствуют групповым выбросам, которые легче обнаружить. 1 СК = 1 существенному количеству = 8 кг плутония.

Скорость разделения плутония	1 СК/год	1 СК/месяц	1 СК/сутки
Своевременное обнаружение за	365 дней	30 дней	7 дней
Современный фон и активные выбросы	50 - 150	52	51
Современный фон без выбросов	35 - 95	41	41
Фон через 10 лет после конца выбросов	20 - 25	21	20
Фон через 30 лет после конца выбросов	5	6	5

Количество образцов может быть еще уменьшено, если будут наблюдаться только те страны-участницы, которые имеют ядерные программы или объявленные планы по созданию ядерной инфраструктуры, в котором случае наблюдаемая площадь сократится до 9,8 миллиона квадратных километров. Страны, которые будут исключены из верификационной схемы, располагаются ближе к экватору, где структура экваториальных ветров в основном способствует вертикальному переносу воздушных масс, что затрудняет обнаружение факелов в горизонтальной плоскости. Таблица 4 показывает, что количество требующихся образцов уменьшается примерно в два раза для каждого сценария до примерно 50 образцов в сутки для крупномасштабной и среднемасштабной переработки при современных условиях, несмотря на то, что площадь наблюдаемой области сократилась всего на одну треть. Мелкомасштабная деятельность по переработке порядка одного существенного количества в год снова приведет к диапазону от 50 до 150 случайных образцов в сутки в зависимости от профиля эмиссии. Для будущих сценариев, в которых фон будет распадаться в течение 10 или 30 лет, количество случайных образцов выровняется для всех скоростей переработки до 20 или 5 образцов в сутки соответственно.

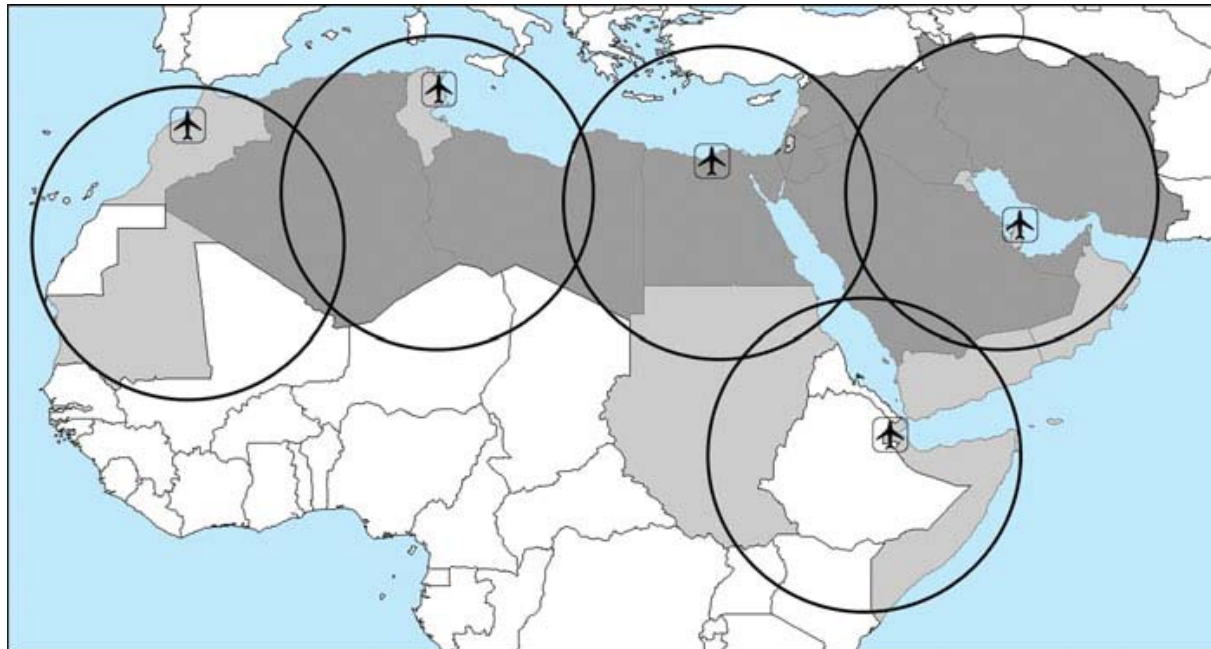
В целом, за исключением малых скоростей постоянной эмиссии в сценарии с высоким фоном, количество требуемых образцов за сутки для своевременного обнаружения перерабатывающих заводов различных размеров будет примерно одинаково.

## РЕАЛИЗАЦИЯ

Ежедневный забор десятков или сотни образцов воздуха над большой областью будет представлять организационную проблему. Результаты, представленные в таблицах 3 и 4, могут быть использованы для достижения баланса между целями верификации, технической реализуемостью, и финансовыми возможностями, и их корректировки время от времени. Для того, чтобы обеспечить забор 50 или 100 образцов в сутки на протяжении всего Ближнего Востока, или его части, наиболее подходящей системой забора были бы многочисленные малые самолеты или беспилотные летательные аппараты, или несколько самолетов разведывательного типа с большей дальностью полета, летящих по различным маршрутам и собирающих в течение полета много образцов. На рисунке 5 показан пример второго типа, где от трех до пяти самолетов будут отправляться в ежедневные полеты для забора образцов в местоположениях, случайным образом выбранных перед полетом. Образцы воздуха могут направляться в центральную лабораторию, или в несколько региональных лабораторий для измерения концентрации криптона-85.

Вероятность обнаружения может быть увеличена за счет применения стратегических конфигураций поиска для того, чтобы более эффективно покрывать область наблюдения, например, обеспечивая минимальное количество заборов образцов над страной или избегая мертвых зон по слишком многим последовательным дням.

После того, как образец воздуха будет собран, его транспортировка и анализ не будут критическими по времени с чисто технической точки зрения из-за большого периода полураспада криптона-85, но быстрый анализ может оказаться желательным для своевременного обнаружения небольших предприятий и для обеспечения уверенности в соблюдении договора. Детекторы криптона-85 следующего поколения позволят использовать образцы воздуха меньшего объема и проводить короткие измерения в течение нескольких часов, что сильно облегчит забор и анализ образцов<sup>31</sup>.



**Рисунок 5.** Возможная реализация системы верификации, позволяющей собирать образцы воздуха в случайных местоположениях. Самолеты или беспилотные летательные аппараты, взлетающие из нескольких аэропортов, могут собирать образцы в определенной области, чтобы наиболее эффективно покрывать наблюдаемую область.

Планируется, что два перерабатывающих завода в Селлафилде будут закрыты в 2021 году, или через несколько лет после этого, в зависимости от их производительности при завершении их имеющихся контрактов. Это уменьшит фоновые флуктуации над Европой и Ближним Востоком. Если Ла Хаг также прекратит выбрасывать криптон-85, то флуктуации над Ближним Востоком практически исчезнут, что с течением времени увеличит вероятность обнаружения (или понизит организационные требования к поддержанию вероятности обнаружения в 90%). Как показано в этом исследовании, уменьшение фоновой концентрации криптона-85 будет сильно способствовать возможности обнаружения тайной переработки.

С другой стороны, в аспекте стимуляции верификации зоны, свободной от ядерного оружия, на Ближнем Востоке, Ла Хаг (и Селлафилд) могут предоставить данные по пакетным выбросам криптона-85, делающие флуктуации более предсказуемыми. Моделирование переноса в атмосфере может быть использовано для предсказания концентрации в образце воздуха для заданных моментов времени и местоположений. Это позволит также объяснить ложные положительные обнаружения высоких концентраций и увеличить надежность верификационного режима.

Если Израиль решит присоединиться к зоне, свободной от ядерного оружия, на Ближнем Востоке, или к региональному соглашению о прекращении производства ядерных материалов, не отвечая на вопросы о прошлом Димоны, то забор образцов в большой области позволит избежать доступа на площадку. Отсутствие продолжающейся переработки в Димоне станет верифицируемым, если только не будет установлена эффективная система захвата криптона-85.

## ВЫВОДЫ

В атмосфере наблюдается высокая концентрация криптона-85, оставшаяся от военных программ переработки, в основном в Соединенных Штатах и Советском Союзе во время холодной войны, и

поддерживаемая гражданской деятельностью по переработке, в основном в Ла Хаге во Франции и в Селлафилде в Великобритании. Это затрудняет эффективный мониторинг любого договора, который запрещает переработку для ядерного оружия. Однако, дистанционный мониторинг криптона-85 от необъявленной переработки может быть частью договора о прекращении производства расщепляющихся материалов, может служить дополнительной мерой для системы гарантий МАГАТЭ для мониторинга исполнения Договора о нераспространении ядерного оружия и может быть важным инструментом верификации моратория на переработку или зоны, свободной от ядерного оружия, на Ближнем Востоке, или в Восточной Азии. Современная фоновая концентрация криптона-85 в атмосфере делает его в особенности проблемным для дистанционного обнаружения тайной деятельности по переработке в неизвестных местоположениях, и она слишком высока для реализации эффективной и экономичной системы мониторинга окружающей среды на большой площади с помощью стационарных установок. Однако, локальные программы забора образцов или стационарные установки могут быть направлены на верификации отсутствия деятельности на известных или подозреваемых станциях переработки, таких, как Димона.

Для тайных перерабатывающих заводов в неизвестных местоположениях забор образцов воздуха в случайных позициях в течение длительных периодов времени может привести к своевременному обнаружению до того момента, как будет выделено существенное количество плутония.

В этом анализе эффективности программ случайного забора образцов рассматривались четыре сценария выбросов криптона-85: текущие выбросы из Ла Хага во Франции и Селлафилда в Великобритании продолжают; текущий фоновый уровень без дополнительных выбросов от продолжающейся переработки в Ла Хаге и Селлафилде; фоновый уровень через 10 лет после окончания гражданской переработки, и фоновый уровень через 30 лет после окончания гражданской переработки. Показано, что для современного Ближнего Востока, где израильское предприятие в Димоне остается единственным действующим перерабатывающим предприятием, около 50 случайных образцов воздуха за сутки будут достаточны для обеспечения 90% вероятности обнаружения тайных перерабатывающих заводов среднего размера в странах Ближнего Востока с ядерными программами или амбициями. Мониторинг всех ближневосточных стран, даже тех, у которых нет ядерных планов, потребует забора примерно 100 случайных образцов в день.

Для обеих региональных случаев непрерывные выбросы от перерабатывающих заводов меньшего размера более трудно обнаружить при современных фоновых условиях, и для этого потребуются забор примерно втрое большего количества образцов за день. Однако, групповые выбросы сделают даже малые перерабатывающие заводы столь же обнаружимыми, как и более мощные предприятия.

Забор многочисленных образцов за день на всем Ближнем Востоке можно будет осуществить при помощи флота малых самолетов или беспилотных летательных аппаратов, или полетов самолетов дальнего действия с забором нескольких образцов за один полет. Образцы потребуется переслать для анализа в центральную лабораторию, или в одну из нескольких региональных лабораторий. Тем не менее, ежедневный забор десятков или сотни образцов воздуха на большой площади будет довольно сложным. Прекращение крупномасштабных выбросов криптона от гражданской переработки в Ла Хаге и Селлафилде со временем существенно сократит необходимое количество образцов, требующееся для мониторинга Ближнего Востока; в конце концов будет достаточно собирать менее 10 образцов в день. Когда фон криптона-85 уменьшится, малые перерабатывающие предприятия неминуемо станут столь же обнаружимыми, как и более крупные.

#### ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. A. Glaser, Z. Mian, S. H. Mousavian, and F. von Hippel, "Building on the Iran Deal: Steps Toward a Middle Eastern Nuclear-Weapon-Free Zone," *Arms Control Today*, (December 2015).
2. United Nations Security Council, Resolution 3263, 9 December 1974, [http://www.securitycouncilreport.org/atf/cf/%7B65BFCF9B-6D27-4E9C-8CD3-CF6E4FF96FF9%7D/Disarm%20ARES3263%20\(XXIX\).pdf](http://www.securitycouncilreport.org/atf/cf/%7B65BFCF9B-6D27-4E9C-8CD3-CF6E4FF96FF9%7D/Disarm%20ARES3263%20(XXIX).pdf).
3. United Nations, Department of Disarmament Affairs, "Effective and Verifiable Measures Which Would Facilitate the Establishment of a Nuclear-weapon-free Zone in the Middle East," Report of the Secretary-General, (1991).
4. Гражданские программы переработки и реакторов-размножителей часто сталкивались с техническими проблемами и оказывались более дорогими по сравнению с первоначальными оценками, в то время

- как уран оказался не таким дефицитным, как это предсказывали. International Panel on Fissile Materials, "Plutonium Separation in Nuclear Power Programs: Status, Problems, and Prospects of Civilian Reprocessing Around the World," Research Report of the International Panel on Fissile Material, Princeton, N.J., (2015), <http://fissilematerials.org/library/rr14.pdf>.
5. F. von Hippel, D.H. Albright, and B.G. Levi, "Quantities of Fissile Materials in US and Soviet Nuclear Weapons Arsenals," PU/CEES Report No. 168, Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University, (1986). M. Kalinowski, H. Sartorius, S. Uhl, and W. Weiss, "Conclusions on plutonium separation from atmospheric krypton-85 measured at various distances from the Karlsruhe reprocessing plant," *Journal of Environmental Radioactivity*, 73(2004): 203-222.
  6. Возможность использования криптона-85 для верификации в отношениях между Индией и Пакистаном обсуждалась в работах Z. Mian, and A. H. Nayyar, "An Initial Analysis of 85 Kr Production and Dispersion from Reprocessing in India and Pakistan," *Science & Global Security*, 10(2002): 151-179; O. Ross, J. Ahlswede, R. Annewandter, S. Rast, H. Schluenzen, and M.B. Kalinowski, "Simulations of atmospheric krypton-85 to assess the detectability of clandestine nuclear reprocessing," IAEA-CN-184/034 (2010), <https://www.iaea.org/safeguards/symposium/2010/Documents/PapersRepository/034.pdf>.
  7. M. Kalinowski, 2004; R. S. Kemp, C. Schlosser, A performance estimate for the detection of undeclared nuclear-fuel reprocessing by atmospheric Kr-85, *Journal of Environmental Radioactivity* 99(2008): 1341-1348.
  8. H. Feiveson, A. Glaser, Z. Mian, and F. von Hippel, "Unmaking the Bomb, A Fissile Material Approach to Nuclear Disarmament and Nonproliferation," *MIT Press*: (2014).
  9. Thomas B. Cochran, Harold A. Feiveson, Walt Patterson, Gennadi Pshakin, M.V. Ramana, Mycle Schneider, Tatsujiro Suzuki, and Frank von Hippel, "Fast Breeder Reactor Programs: History and Status," International Panel on Fissile Materials, Research Report #8, Princeton, N.J., (2010). [http://fissilematerials.org/publications/2010/02/fast\\_breeder\\_reactor\\_programs\\_.html](http://fissilematerials.org/publications/2010/02/fast_breeder_reactor_programs_.html).
  10. Implementation of the NPT Safeguards Agreement in the Syrian Arab Republic, Report by the Director General. IAEA Board of Governors, (24 May 2011), <https://www.iaea.org/sites/default/files/gov2011-30.pdf>.
  11. D. E. Ferguson to F. L. Culler, "Subject: Simple, Quick Processing Plant," Intra-Laboratory Correspondence, Oak Ridge National Laboratory, (August 30, 1977).
  12. IAEA Safeguards Glossary 2001 Edition, [https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea\\_safeguards\\_glossary.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea_safeguards_glossary.pdf).
  13. Отработавшее топливо из реактора с обычной водой содержит около 10 кг плутония на тонну. Отработавшее топливо из тяжеловодного реактора содержит около 1 кг плутония на тонну.
  14. D. Ferguson, 1977, "Для переработки должно быть доступно достаточное количество отработавшего топлива. Кроме того, плутоний, извлеченный из топлива реактора с обычной водой с высокой степенью выгорания будет иметь изотопный состав, неудобный для применения в ядерном оружии из-за большого тепловыделения и излучения нейтронов." (См. ссылку 11)
  15. Применяемая скорость выброса является минимальной для отработавшего топлива из тяжеловодных реакторов, где на одно деление урана-235 образуется около одного ядра плутония-239. В топливе из энергетического реактора на обычной воде ожидается большее значение скорости выброса, поскольку на одно ядро образовавшегося плутония приходится около четырех делений урана-235. См. также M. Schoepner, A. Glaser, "Present and future potential of krypton-85 for the detection of clandestine reprocessing plants for treaty verification," *Journal of Environmental Radioactivity*, 162-163(2016): 300-309.
  16. N. Soelberg, T. Garn, M. Greenhalgh, J. Law, R. Jubin, D. Strachan, and P. Thallapally, "Radioactive Iodine and Krypton Control for Nuclear Fuel Reprocessing Facilities," *Science and Technology of Nuclear Installations*, Article ID 702496 (2013); U. Nandanwar, Kai Cold-snow, Vivek Utgikar, Piyush Sabharwal, and D. Eric Aston, "Capture of harmful radioactive contaminants from off-gas stream using porous solid sorbents for clean environment - A review," *Chemical Engineering Journal*, 306(2016): 369-381.
  17. A. Bollhofer, C. Schlosser, O. Ross, H. Sartorius, and S. Schmid, "Variability of atmospheric krypton-85 activity concentrations observed close to the ITCZ in the southern hemisphere," *Journal of Environmental Radioactivity*, 127(2014): 111-118; C. Schlosser, M. Konrad, S. Schmid, "85Kr Activity Determination in Tropospheric Air," Activity Report, International Foundation HFSJG (2013).
  18. См. таблицу 2 в Frank von Hippel, "Fissile Material Controls in the Middle East: Steps Toward a Middle East Zone Free of Nuclear Weapons and All Other Weapons of Mass Destruction," Research Report of the International Panel on Fissile Materials, Princeton, N.J., (October 2013), <http://fissilematerials.org/library/rr11.pdf>.
  19. International Panel on Fissile Materials, "Global Fissile Material Report 2010, Balancing the books: production

- and stocks, fifth annual report of the International Panel on Fissile Materials." International Panel on Fissile Materials, Princeton, N.J. (2010), <http://ipfmlibrary.org/gfmr10.pdf>; International Panel on Fissile Materials, "Global Fissile Material Report 2011: nuclear weapon and fissile material stockpiles and production," Princeton, N.J., (2011) <http://ipfmlibrary.org/gfmr11.pdf>.
20. Для анализа метеорологической картины и размещения станций для обеспечения оптимального покрытия предполагались суточные выбросы в  $2.9E+14$  Бк / 365 дней =  $8E+11$  Бк.
  21. A. Stohl, C. Forster, A. Frank, P. Seibert, and G. Wotawa, "Technical Note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2," *Atmos. Chem. Phys*, 5(2005): 24612474. Каждое прямое моделирование выбросов из предприятия в Димоне продолжалось 10 суток, включало один миллион частиц и результаты помещались в пространственную сетку с шагом 0,5 градуса с временным шагом в три четверти часа.
  22. S. Saha et al., "NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010," Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, Colorado (2010).
  23. N. Soelberg, "Radioactive Iodine and Krypton Control for Nuclear Fuel Reprocessing Facilities." (См. ссылку 16)
  24. Для сравнения, было оценено, что Пакистан производит менее одного существенного количества в месяц, смотрите [http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/Pakistan\\_WGU\\_and\\_WGPu\\_inventory\\_Oct\\_16\\_2015\\_final\\_1.pdf](http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/Pakistan_WGU_and_WGPu_inventory_Oct_16_2015_final_1.pdf).
  25. Как описано в M. Schoepner, "Present and future potential of krypton-85" (ссылка 15), фоновые эмиссии от известных перерабатывающих заводов усреднялись в течение года. Рассматривались эмиссии от следующих перерабатывающих заводов (в ТБк/год): Ланчжоу (Китай)  $3.59E+14$ , Ла Хаг (Франция)  $2.26E+17$ , Калпаккам (Индия)  $2.40E+14$ , Тромбей (Индия)  $2.40E+14$ , Димона (Израиль)  $2.88E+14$ , Токаи (Япония)  $1.80E+10$ , Нилоре (Пакистан)  $2.88E+14$ , Маяк РТ-1 (Россия)  $1.40E+16$ , Железногорск (Россия)  $3.60E+15$ , Селлафилд (Великобритания)  $4.53E+16$ . Как описано в подразделе "Профили эмиссии", рассматриваются постоянные эмиссии каждый день в течение года, и групповые эмиссии один день в неделю.
  26. Моделирование факелов рассматривается как база для различных сценариев фона. Для современного фона, включающего флуктуации от недавних эмиссий, даже факел от промышленных установок станет не обнаружимым через несколько дней. Однако, в сценариях с пониженным фоном факел может оставаться обнаружимым в течение более длительного времени.
  27. A. Stohl et al., Technical Note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART (ссылка 11); S. Saha et al., NCEP Climate Forecast System Reanalysis (ссылка 22). Каждое прямое моделирование выбросов из гипотетических перерабатывающих заводов продолжалось 10 суток, включало один миллион частиц и результаты помещались в пространственную сетку с шагом 0,5 градуса с временным шагом в три четверти часа.
  28. M. Schoepner, Present and future potential of krypton-85 (ссылка 15).
  29. A. Bollhofer, Variability of atmospheric krypton-85 activity (ссылка 17).
  30. M. Kohler, H. Daerr, P. Sahling, C. Sieveke, N. Jerschabek, M.B. Kalinowski, C. Becker, and K. Sengstock, "All-optical production and trapping of metastable noble gas atoms down to the single atom regime," *Europhysics Letters*, 108 (2014).
  31. M. Kohler, All-optical production (См. ссылку 30).
  32. IAEA Country Nuclear Power Profiles, 2013 edition, [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CNPP2013\\_CD/pages/index.htm](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CNPP2013_CD/pages/index.htm); Nuclear Threat Initiative, Country Profiles, <http://www.nti.org/learn/countries/>.