## АТМОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ И СОЦИАЛЬНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ КОНФЛИКТОВ И АКТОВ ЯДЕРНОГО ТЕРРОРИЗМА<sup>\*</sup>

O. B. Toon<sup>1</sup>, R. P. Turco<sup>2</sup>, A. Robock<sup>3</sup>, C. Bardeen<sup>1</sup>, L. Oman<sup>3</sup>, and G. L. Stenchikov<sup>3</sup>

## Краткое резюме

Мы оцениваем потенциальные ущерб и дымовые образования, связанные со взрывами небольших ядерных зарядов в современных мегаполисах. В то время как общее количество ядерных боеголовок в мире уменьшилось в три раза по сравнению с пиком в 1986 году, число ядерных государств растет, и существует возможность многочисленных рецидивов гонки ядерных вооружений, но теперь - на региональном уровне. Известны восемь стран, уже обладающих ядерным оружием; в двух государствах оно создается; и еще 32 страны имеют на сегодня расщепляющиеся материалы в количествах, необходимых производства значительных арсеналов маломощных (типа бомбы на Хиросиму) ядерных взрывных устройств. Население и экономическая активность по всему миру сосредоточиваются все более в мегаполисах, которые могут стать целями в ядерных конфликтах. Наш анализ показывает, что при подрыве нескольких «маленьких» ядерных боезарядов в центре города количество погибших людей и масса дыма от пожаров могут быть в 100 раз больше, чем в случае взрыва единичного ядерного устройства с мощностью, равной сумме мощностей указанных небольших боезарядов. Единственный «маленький» ядерный взрыв в центре города мог бы привести к большему числу погибших, в некоторых случаях и с точки зрения важности, чем это было когда-либо в главных исторических конфликтах во многих странах.

Мы анализируем вероятный исход регионального ядерного конфликта со взрывом одной сотни 15-килотонных зарядов (что составляет менее 0,1% от суммарной мощности сегодняшнего ядерного арсенала на Земле). Нами установлено, что такой обмен ударами привел бы к прямым фатальным потерям, сравнимым с теми, что имели место во всем мире в целом во второй мировой войне, или же с теми, которые уже рассчитаны для случая «контрсиловой» атаки между сверхдержавами. Мегаполисы, подвергнувшиеся выпадению из атмосферы долгоживущих радионуклидов, вероятно, должны будут быть покинутыми на неопределенное время, с тяжелыми последствиями как для данной страны, так и в международном плане. Наши исследования также показывают,

<sup>\*</sup> Авторизованный перевод статьи "Toon, O. B., Turco, R. P., Robock, A., Bardeen, C., Oman, L., and Stenchikov, G. L.: Atmospheric effects and societal consequences of regional scale nuclear conflicts and acts of individual nuclear terrorism, Atmos. Chem. Phys., 7, 1973-2002, 2007" (<u>http://www.atmos-chem-phys.net/7/1973/2007/acp-7-1973-2007.html</u>). Перевод с английского: В.Е. Ярынич.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado, Boulder, Colorado, USA.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Univ. of California, Los Angeles, USA.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Department of Environmental Sciences, Rutgers Univ., New Brunswick, New Jersey, USA.

что дым от горящих в региональной войне городов поднялся бы вследствие эффекта пиро-конвекции (*pyro-convection*) в верхнюю тропосферу.

Robock и др. [2006] отметили, что дым должен затем подниматься глубоко в стратосферу из-за атмосферного нагревания, индуцируя значительные климатические аномалии глобального масштаба. Мы также ожидаем существенных нарушений озонового слоя Земли. Наряду с тем, что в наших предположениях имеется много неопределенностей, принципиальными неизвестностями являются тип и масштаб конфликта, который может произойти. Размах и суровость опасностей отождествились со значительной угрозой для мирового сообщества. Они заслуживают как внимательного анализа правительствами во всем мире с помощью экспертных кругов, так и широких публичных дебатов.

### 1. Введение

В 80-х годах прошлого столетия результаты количественных исследований возможных последствий ядерного конфликта между сверхдержавами привели к острым научным и политическим дебатам, а также вызвали глубокую общественную озабоченность (Crutzen и Birks, 1982; Turco и др., 1983; Pittock и др., 1989). Признание того факта, что такие конфликты могли бы привести к неприемлемому по уровню глобальному ущербу, внесло свой вклад в последовавшие затем сокращения ядерных арсеналов и улучшение отношений между главными ядерными государствами. В данной работе мы впервые предлагаем обстоятельное количественное исследование последствий ядерного конфликта между небольшими вновь возникающими ядерными странами, в том числе для случая использования единичных ядерных зарядов каким-либо государством или террористами. Robock и др. [2006] анализируют те климатические изменения, которые могут быть вызваны выбросами дыма от такого типа конфликта.

Потенциальный выходной эффект от взрывов ядерных зарядов примерно той же мощности, что была у бомб, сброшенных на Японию во второй мировой войне, неожиданно велик. По крайней мере, восемь стран способны транспортировать и взрывать подобные устройства. Кроме того, Северная Корея, повидимому, имеет растущие запасы ядерных боезарядов, а Иран подозревается в проведении работ по обогащению урана – необходимой предпосылки для создания ядерного оружия. Еще тридцать две страны, не имеющие пока ядерного оружия, владеют расщепляющимися материалами в количествах, требуемых для его создания, при этом некоторые - в достаточно короткий период времени. Для этих стран, региональный конфликт с применением умеренного количества 15-килотонных (Кт, эквивалентная взрывная мощность тринитротолуола) зарядов для атаки по городам мог бы вызвать потери, превышающие, в некоторых случаях по степени важности, их жертвы в предшествовавших конфликтах. Действительно, в некоторых таких случаях, потери могут быть соизмеримы с оценками ущерба от ограниченной войны между сверхдержавами с применением тысяч боезарядов общей мощностью в несколько тысяч мегатонн (Мт). Быстрое выпадение радиоактивных осадков от небольших наземных ядерных взрывов должно вести к оставлению населением значительной части полвергнувшейся напалению территории вследствие ее заражения и непригодности условий для обитания. Из-за дыма, образующегося при вызванных взрывами пожарах, возможно, что от 50 до 100 пятнадцати-килотонных зарядов, примененных по городским центрам, привели бы к глобальным климатическим нарушениям, беспрецедентным в летописной истории человечества [Robock и др., 2006]. Индивидуум, обладающий одним их тысяч существующих легких ядерных зарядов, мог бы убить или ранить в террористической атаке миллион человек.

Ниже мы сначала обсуждаем арсеналы существующих, или потенциальных, ядерных государств. Затем описываем потери от взрыва и последующего пожара, вызванного термальной радиацией, при ударе по одному мегаполису ядерным зарядом небольшой мощности. Следующим шагом является обсуждение потерь, которые могли бы иметь место, если бы текущие и прогнозируемые арсеналы такого оружия были использованы в региональном конфликте. После этого рассматривается влияние радиоактивного заражения. Наконец, мы описываем количество дыма, которое может быть создано в конфликте регионального масштаба. В конце каждого из этих разделов указываются в общих чертах соответствующие неопределенности.

В нашем исследовании мы попытались предложить реалистичные сценарии. Однако, мы не имели доступа ни к военным планам какой-либо страны, ни к достоверным данным о существующих ядерных арсеналах, средствах доставки, или планах их развития, производства и развертывания. Очевидно, существует много путей, по которым региональные конфликты могут развиваться. Мнения относительно возможности региональной ядерной войны разнятся от практически невероятной до апокалиптической. Консерватизм в таких делах требует, чтобы был рассмотрен диапазон правдоподобных сценариев, обусловленных наличием самого ядерного оружия и историей региональных конфликтов. В представленном анализе мы выбрали два потенциальных сценария: 1) единичное небольшое ядерное устройство, взорванное террористами в центре города; 2) региональный обмен ядерными ударами между двумя недавно возникшими ядерными странами с применением, в общей сложности, до одной сотни боезарядов малой (15 Кт) выходной мощности. Мы нисколько не оправдываем эти сценарии в будущем, но должны заметить, что большинство граждан и политиков отдают себе сегодня отчет о возможном бедствии в результате ядерной конфронтации между Израилем, Ираном и Сирией, или индопакистанского территориального спора. Кроме того, поскольку знания о ядерном оружии и способах его создания распространяются, возможное число и комбинации горячих точек умножаются. Тот факт, что ядерное оружие такого типа, о котором мы здесь говорим, уже было использовано в прошлом в военных действиях, подтверждает, что предложенные нами сценарии осуществимы.

## 2. Ядерные арсеналы

В таблице 1 перечислены известные мировые ядерные арсеналы. Договором 1968 года о нераспространении ядерного оружия (1968 Treaty on Non-Proliferation of Nuclear Weapons, или сокращенно NPT) пять стран признаны в качестве ядерных государств: Франция, КНР, Россия (ранее - СССР), Великобритания и США. Во всем мире насчитывается около 30 тысяч ядерных боезарядов, при этом 95% из них – в России и США. На Земле имеется также такое количество очищенных и неочищенных ядерных материалов, которого достаточно для создания еще 100 тысяч единиц оружия, и ни одно государство не открыло точное число боезарядов в своих хранилищах [National Academy of Sciences, 2005]. Однако, стратегические арсеналы Великобритании, Франции, России и США могут быть оценены с приемлемой достоверностью из договоров, которые позволяют проведение проверок соблюдения установленных лимитов на число и загрузку средств доставки (носителей). США и Россия имеют также значительные запасы стратегических боезарядов в резерве, или на хранении, сверх тех, которые зачислены за текущим числом носителей. Количество тактического ядерного оружия, включая мины, артиллерийские снаряды, глубинные и другие бомбы, более неопределенно; например, только российские запасы тактического оружия оцениваются в пределах 5000 единиц [National Academy of Sciences, 2005]. На рисунке 1 приведены тенденции изменения количества ядерных боезарядов за несколько последних десятилетий (исключая 10000 единиц с неопределенным статусом в России в 2002 году). Как можно видеть, число боезарядов уменьшилось примерно в три раза за последние двадцать лет.

На сегодня имеются три ядерных государства *de facto*, которые создали свое ядерное оружие вопреки ограничениям NPT: Индия, Израиль и Пакистан. Арсеналы этих стран (так же, как и КНР) не вполне документированы. Число боезарядов, контролируемых ими, было определено несколькими исследователями вначале через оценку количества высокообогащенного урана (*HEU*) или плутония, которое могло бы быть произведено каждой страной и направлено на военные цели вместо применения в мирных целях. Затем принималось предположение насчет количества расщепляющегося материала, необходимого для каждого боезаряда. Несмотря на то, что не все имеющиеся в руках у военных материалы могут быть задействованы для создания оружия, цифры в таблице 1 это допускают. Мы пренебрегли возможностью наличия ядерных устройств в Северной Корее, хотя имеются оценки, что до десяти плутониевых зарядов мощностью от 10 до 20 Кт там могут быть произведены [Norris и Kristensen, 2005b].

Индия и Пакистан провели ядерные испытания в 1998 году. Имеются большие различия между объявленной мощностью этих взрывных устройств и теми результатами, которые были получены при изучении данных сейсмических наблюдений [Wallace, 1998]. Однако по мощности некоторые из этих устройств были схожи с теми, что были впервые испытаны в США, и теми, которые были сброшены на Хиросиму и Нагасаки во второй мировой войне. Индия заявила, что она обладает устройствами, созданными на основе как синтеза, так и расщепления [Norris и Kristensen, 2005b]. Предполагается, что Индия может попытаться в следующие 5-7 лет достигнуть ядерного паритета с Францией, Великобританией и Китаем, создав 300-400 боезарядов и развернув их на триаде носителей (ракеты, самолеты и подводные лодки) [Norris и Kristensen, 2005b].

Некоторые страны обладали ядерным оружием в прошлом, но отказались от него. Южная Африка создала шесть устройств, которые затем уничтожила, возможно – после одного ядерного испытания [Albright и др., 1997]. Беларусь, Украина и Казахстан унаследовали ядерное оружие после распада СССР, но передали его России.

Как суммировано в таблице 2, имеется большое число стран, которые обладают сырьем для создания ядерного оружия, главным образом – в рамках их программ с гражданскими ядерными реакторами. Всего, 45 государств идентифицированы в таблице 2 как имеющие предшествующие ядерному оружию программы, существующие оружейные хранилища, или же потенциал для становления ядерной державой. Тринадцать стран, включая Иран, имеют действующие предприятия по производству плутония и/или обогащению урана. Получение расщепляющегося материала, т.е. наиболее трудный шаг на пути создания оружия, есть настолько же откровенное действие, как работа гражданского реактора в тандеме с предприятием соответствующей сложности по переработке плутония. Все необходимое в части технологии, оборудования и опыта доступно на международных рынках, которые номинально регулируются, чтобы предотвратить распространение. Тем не менее, как стало ясно в последние десять лет, страны, желающие создать ядерное оружие, кажутся вполне способными сделать это, несмотря на международные ограничения и договора. Всего, 19 стран имеют программы по разработке ядерного оружия, и особенно следует отметить Аргентину, Бразилию, Северную Корею, Южную Корею и Тайвань [Albright и др., 1997]. В 1992 году МАГАТЭ (International Atomic Energy Agency) контролировало менее 1% мировых запасов *HEU* и только около 35% общего количества плутония (*Pu*) [Albright и др., 1997]. Сегодня под контролем находится примерно такая же небольшая их часть.

Возможное число ядерных устройств, которые могли бы быть созданы из существующего количества Ри и НЕИ в разных странах, варьируется от одной единицы до десятков тысяч (Таблица 2). Мы предположили в данной таблице, что для создания одного боезаряда необходимо наличие 10 кг плутония, но при этом не различали различные виды плутония - отделенного от топливных стержней, неотделенного, а также обогашенного до наиболее предпочтительного уровня <sup>239</sup>Ри. Оружие, разработанное в США и России, содержит, однако, около 3-4 кг Ри; предполагается также, что в индийских боезарядах находится в среднем по 5 кг Ри. Относительно НЕИ в таблице 2 принято, что на один боезаряд необходимо иметь 25 кг. *НЕU* существует в различных формах обогащения <sup>235</sup>U, и мы не различали специально типы оружейного материала. Однако, как только уран обогащен до уровня *HEU*, большая часть работы по созданию ядерного оружия уже сделана, и HEU сам по себе может быть использован в боезаряде. 8 стран на сегодня имеют ядерное оружие, одна (Северная Корея) разрабатывает его, и одна (Иран), как считается, активно стремится его создать. Другие 32 страны обладают расщепляющимися материалами, из которых ядерное оружие могло бы быть произведено.

Многие ядерные заряды имеют небольшие размеры и вес и легко могут транспортироваться в легковых автомобилях или фургонах. Бомбы, сброшенные на Хиросиму и Нагасаки, весили 4040 кг и 4900 кг соответственно [Gibson, 1996]. При последующих разработках величина боезарядов и их вес по отношению к выходной мощности были существенно уменьшены. Например, каждый из 300 боезарядов на межконтинентальных баллистических ракетах (МБР) в арсенале США весит только около 100 кг, в то время как остальные 850 зарядов имеют вес по 300 кг и менее [Gibson, 1996]. Боеголовки на ракетах американских подводных лодок такие же легкие. США располагают также около 480 единиц нестратегических бомб B61, размещенных в шести европейских странах, каждая с мощностью 100-500 Кт и весом примерно в 300 кг [Gibson, 1996]. США произвели (и сняли с вооружения) 2000 артиллерийских снарядов W33 с диаметром 20 см, длиной 94 см, весом около 110 кг и мощностью 5-10 Кт [Gibson, 1996].

Главными неопределенностями в нашем анализе являются: Каково истинное количество ядерного оружия в разных странах? Сколько боезарядов эти страны способны успешно доставлять в разные точки Земли? Какие это точки? Как было отмечено в 2005 году Национальной Академией Наук (National Academy of Sciences), а также Albright и другими [1997], лучшие оценки количества ядерного оружия могут быть получены только от стран, согласных открыть такую информацию. Как будет показано ниже, имеется много сценариев развязывания войн. В нашей работе мы сфокусировались на доставке около 50 единиц маломощных ядерных зарядов в городские центры, поскольку это есть грубая оценка того количества оружия, которое находится сегодня в наименыших известных ядерных арсеналах (Таблица 1). Можно доказывать, что наименьшие ядерные страны сейчас не способны доставлять даже эти 50 маломощных зарядов. Однако история показывает, что если государства получали собственное ядерное оружие, они затем продолжали развивать его, увеличивая выходную мощность. В нашем идеализированном исследовании используется около 0,3% мирового ядерного арсенала по числу боезарядов и только 0,03% по их совокупной мощности. Если региональная гонка ядерных вооружений будет продолжаться, количество боезарядов и их общая мощность могут легко превысить данные, использованные здесь нами.

## 3. Возможные жертвы от взрыва в большом городе боезаряда типа бомбы, сброшенной на Хиросиму

Чтобы подсчитать число убитых и пострадавших от ядерного взрыва, мы используем равенство (1):

$$N_{fatalities/casualties} = \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{R} rP(r,\theta) \alpha(r) d\theta dr$$
(1)

Интеграл означает совокупную оценку по всем секторам города, в которых плотность населения (P) разная. Вероятность гибели или ранения  $\alpha$  зависит от r - расстояния от эпицентра взрыва, или "ground zero". R есть максимальное расстояние от эпицентра, при котором произведение P и  $\alpha$  дает более чем одну смерть или ранение в расчетной ячейке. Вероятности смерти или ранения зависят от типов зданий, степени открытости людей на местности, времени дня, погоды, топографии и многих других факторов. Но мы предположили, что  $\alpha$  зависит только от расстояния от эпицентра.

Ядерный взрыв вызывает прямые разрушения, смерть и ранения, главным образом, вследствие немедленного гамма- и нейтронного излучения, избыточного давления и ветров от взрывной волны, а также теплового воздействия огненного шара (термальный импульс). (Последующий эффект от радиоактивного заражения рассмотрен в разделе 5). Несмотря на то, что мы предпринимаем попытки оценить ущерб и потери, связанные с ядерными взрывами различной мощности, на основе физических возмущений, остается много неопределенностей для принятия таких предположений. Однако, для сценариев, рассматриваемых в данной работе, выходные мощности взрывов соответствуют тем, что были при атомных бомбардировках Хиросимы и Нагасаки, по которым в части количества смертей и ранений собрана значительная документированная информация. Хотя детальные данные об уязвимости человека в современных больших городах, вероятно, могут сильно отличаться от тех, что получены для Хиросимы и Нагасаки, мы в нашем анализе исходим из того, что в целом вероятности потерь в первом приближении должны быть такими же, особенно в центральной зоне тяжелых разрушений, где количество погибших будет наибольшим. Соответственно, при оценке потенциальных потерь в ядерном конфликте или террористической атаке, мы будем опираться на результаты атомных бомбардировок Японии во второй мировой войне.

На рисунке 2 показаны полученные в двух независимых исследованиях [Oughterson и Warren, 1956; Ishikawa и Swain, 1981] данные о погибших в Хиросиме и Нагасаки. Процент убитых внутри этих городов практически одинаков, несмотря на тот факт, что энергия, высвободившаяся при взрыве бомбы в Хиросиме, была эквивалентна 15±3 Кт, а в Нагасаки 21±2 Кт. Несколько более высокая доля погибших в Хиросиме объясняется, вероятно, географической особенностью города. Нагасаки имеет больше холмов, которые заслонили некоторые части города от ударной волны и теплового воздействия. Пожары в Хиросиме были также более интенсивны из-за сухих погодных условий и плоской территории, что способствовало широкому распространению возгораний [Ishikawa и Swain, 1981]. Рисунок 3 иллюстрирует вероятности общих потерь в Хиросиме [Ishikawa и Swain, 1981]. Потери включают смерти и ранения; в этих суммарных данных ранения учтены в двух вариантах: первый – только серьезные ранения, угрожающие жизни потерпевшего в кратчайший срок; второй – все ранения, включая и те небольшие повреждения, которые не связаны с угрозой быстрой гибели человека, но могут привести к его недееспособности.

Мы имеем соответствующие нормальные распределения для данных на рисунках 2 и 3, используя стандартную формулу:  $a(r) = exp (-r^2/2\sigma^2)$ . Здесь *a* есть относительная вероятность смертей или ранений на данном расстоянии *r* от эпицентра, а  $\sigma$  означает эффективное соизмеримое расстояние, или ширину распределения, для рассматриваемого воздействия. Значения  $\sigma$ , полученные из данных на рисунках 2 и 3, обобщены в таблице 3. Мы использовали данные исследований Ishikawa и Swain [1981], чтобы калибровать распределения потерь, поскольку эти данные относятся к периоду спустя год после взрыва, когда наиболее серьезные ранения должны уже как-либо разрешиться, и результаты каждого из уровней воздействия становятся ясными. Полученные распределения могут, тем не менее, представлять консервативную оценку смертей - в том смысле, что медицинский уход после атомной бомбардировки японцев в военное время мог быть более доступным, чем в случае атаки на современный большой город, особенно в развивающемся мире.

Взрывы в Хиросиме и Нагасаки были воздушными. Для наземного взрыва с той же самой мощностью, тепловое излучение при заданной интенсивности накрывает только около 50% области взрыва, т.к. доля энергии заряда, переходящей в тепловое излучение, меняется от 0,35 для воздушного взрыва до 0,18 для взрыва наземного [Glasstone и Dolan, 1977]. Кроме того, при воздушном и наземном взрывах размеры области, подверженной воздействию ударной волны, также различаются. Например, при наземном взрыве область с избыточным давлением по ее контуру в 10 psi (pound-per-square-inch, т.е. фунт на квадратный дюйм – В.Я.) меньше примерно в два раза, чем при воздушном взрыве, в то время как область наземного взрыва с контуром 2 psi составляет 38% от области воздушного взрыва с тем же избыточным давлением [Glasstone и Dolan, 1977]. Чтобы приспособить кривые вероятностей для расчета количества смертей и ранений при наземном взрыве, мы делим соответствующие  $\sigma$  из таблицы 3 на  $\sqrt{2}$ . Это сокращает исследуемую область на 50% по сравнению с воздушным взрывом, грубо компенсируя уменьшенные сферы воздействия как ударной волны, так и теплового излучения.

Полученные выше распределения вероятностей (вероятностей потерь – В.Я.) были совмещены с пространственными распределениями населения в выбранных районах предполагаемых мест ядерных ударов с тем, чтобы определить общее количество смертей и ранений для конкретных сценариев. Мы выбирали такие районы, определяя сначала население в пределах 3-х километрового радиуса вокруг каждой расчетной ячейки по базе данных Land-Scan, 2003. Эта база предоставляет данные по усредненному за 24 часа количеству населения в конкретно взятом месте. Затем мы отобрали наиболее населенные из этих регионов таким образом, чтобы главная расчетная ячейка была удалена, по крайней мере, на 6 км от центральной ячейки ближайшей альтернативной группы ячеек с высокой плотностью населения. Данные по населению сгруппированы в ячейки со стороной 30 arc-seconds – площадь менее 1 км<sup>2</sup> на интересующих нас широтах. В данных расчетах мы не рассматривали сложение потерь при многократных взрывах в перекрываемых зонах в радиусе 3 км от эпицентра. На практике, для наиболее населенных регионов, смерть от ударной волны и термального импульса 15-ти килотонного взрыва не наступит за пределами зоны радиусом около 5 км, а на расстояниях более 9 км не будут иметь место и незначительные ранения.

В таблицах 4 и 5 представлены расчеты количества смертей и ранений (соответственно) для густо населенных городов в ряде стран при вариантах ядерного взрыва как на «оптимальной» высоте, так и на земле. Эти результаты могли бы иметь место при террористической атаке, либо ограниченном ядерном нападении или ударе возмездия. Заметим, что потери от прямого воздействия только одного использованного боезаряда могут насчитывать более миллиона человек, хотя эти сценарии предполагают взрыв ядерного оружия малой мощности. По сравнению с воздушным взрывом, взрывы на земле производят сравнимые, но несколько меньшие, общие потери с гибелью людей – включая смерть от радиоактивного заражения, что будет рассмотрено ниже. Некоторые предшествующие исследователи также анализировали потери в отдельно взятых городах; например, McKinzie и др. [2001] используют подход, подобный нашему, для Пакистана и Индии.

Число погибших во второй мировой войне в Хиросиме и Нагасаки оценивается в 140 000±10 000 и 70 000±10 000 человек соответственно [Ishikawa и Swain, 1981]. Плотность населения в современных крупных городах выше, чем была тогда в Хиросиме и Нагасаки, и, следовательно, в них должно быть больше жертв, как показано в таблице 4. Известные в истории войны в большинстве стран, включая Индию, Пакистан, Израиль, Египет, Аргентину и Бразилию, повлекли жертвы (таблица 4), составляющие только несколько процентов от тех потерь, которые могли бы быть в случае единственного воздушного ядерного взрыва.

В расчетах количества смертей и ранений имеется много неопределенностей. Мы полагаем, что неопределенности в нашем исследовании, связанные с использованием кривых вероятности потерь в Хиросиме и LandScan базы данных о населении, относительно невелики. Наибольшая неопределенность, как отмечено во Введении, заключается в вопросе нацеливания ядерного оружия. Например, населенность некоторых городских районов сильно меняется между днем и ночью согласно модели перемещений людей из дома на работу и обратно. Значит, потери будут зависеть от того, в какое время суток была произведена атака. LandScan база данных определяет усредненную за сутки плотность населения. которая, следовательно, лежит между экстремальными возможностями. Потери будут также зависеть от того, была ли перед атакой проведена эвакуация населения и имеются ли бомбоубежища. Мы предположили здесь, что не было ни эвакуации, ни эффективного использования укрытий. Во-первых, попытки срочной эвакуации из больших городов никогда успешно не заканчивались. Кроме того, немногие из этих городов имеют в нужном количестве убежища, способные защитить от воздействия факторов ядерного взрыва. Несмотря на то, что некоторые современные здания лучше разработаны, чтобы устоять против ударной волны и, с меньшей вероятностью, против возгорания, мы безоговорочно предположили, что все строения должны вести себя так, как это было в Хиросиме во второй мировой войне. Некоторые города могут иметь сложную топографию, которая в состоянии частично заслонить отдельные районы от поражения, как это было в Нагасаки. Как рассматривается в разделе 4, некоторые цели имеют плотность населения, в несколько раз большую, чем в других местах, и, следовательно, для них потери будут выше. В этом разделе исследования мы выбрали пример, основанный на атаках против наиболее населенных областей в каждой стране. Что касается эффекта в районах альтернативных городских целей, он обсуждается в разделе 4.

### 4. Возможные прямые потери в региональной войне

Несколько групп экспертов, рассматривая ряд сценариев обмена, оценивали прямые потери в полномасштабной ядерной войне до распада Советского Союза и уменьшения напряженности между крупнейшими ядерными державами. В 80-х годах в наличии находились десятки тысяч боезарядов, большинство из которых имело мощность от 100 Кт до мегатонны. Из-за различий в предположениях относительно ядерного нацеливания и количества используемых боезарядов оценки потерь расходились более, чем в десять раз. Другим источником различий является выбор способа определения масштаба потерь в зависимости от мощности взрыва – от заряда типа бомбы на Хиросиму до очень мощных боезарядов. Большинство исследователей для масштабирования вероятностей потерь применяют величину ущерба от ударной волны взрыва. Другие использовали потенциал пожаров, что ведет к получению большей по величине площади поражения, и, как правило, в этом случае цифры потерь возрастают в 2,5-4 раза [Postol, 1986].

На верхнем конце прогнозов потерь, в исследовании Ambio study [Middleton, 1982] допускалось 14747 взрывов (173 в южном полушарии) общей мощностью в 5569 Мт. Хотя, как показано в таблице 1, такой конфликт все еще возможен сегодня, нет необходимости извлекать многие из боезарядов из хранилищ. В Ambio study предполагается, что взрывы производятся почти над каждым небольшой величины городом мира (но большинству их в Африке, Южной Аме-Новой Зеландии была подарена пощада). Из 1 миллиарда рике И 300 миллионов человек, проживавших тогда в городских районах северного полушария, по оценкам должны были немедленно погибнуть 750 миллионов, а серьезно ранены 340 миллионов, из которых 200 миллионов вскоре тоже умерли бы. Harwell [1984] рассмотрел атаку только против Соединенных Штатов с применением 3000 боезарядов общей мощностью 1400 Мт и нашел, что 50-100 миллионов человек могут умереть от ударной волны, теплового излучения и пожаров. Эксперты ОТА [1979] обобщили несколько американских правительственных исследований с рядом сценариев, включая полномасштабную атаку против военных и экономических целей в США с применением тысяч боезарядов и высвобождением энергии, эквивалентной взрыву тысяч мегатонн (тринитротолуола – В.Я.). Эти исследователи предположили, что потери, главным образом, из-за ударной волны, должны лежать в диапазоне 20-100 миллионов человек. Такой большой диапазон потерь объясняется тем, что допускались эвакуация населения из городских районов и использование убежищ. Ими был также исследован вариант «контрсилового удара», при котором атакованы были только военные объекты, а американские городские центры не были целями как таковыми. Daugherty и др. [1986] отметили, что многие стратегические цели находятся возле населенных центров. Они брали в контрсиловом ударе против США 3000 боезарядов общей мощностью 1340 Мт, и вывели, что 7-19 миллионов человек в городских районах могут умереть немедленно от взрывной волны и пожаров. Много больше потерь могло бы быть связано также с выпадением радиоактивных осадков.

Несмотря на то, что применение тысяч высоко-мощных зарядов, несомненно, должно вести к большим потерям, чем могут быть при небольшой атаке или обмене ударами малой мощности, мы установили, что число потерь уменьшается не пропорционально общей мощности зарядов. Например, сегодня Россия и США сохраняют намного большие арсеналы, чем необходимо для удара по всем значимым военным целям, так же как и по каждому среднему и большому городу мира. Много зарядов нацелено на одни и те же цели, или предназначены для ударов по ракетным шахтам или подводным лодкам в ненаселенных регионах. При использовании высоко-мощных зарядов уровня мегатонны значительная часть внутри зоны поражения будет иметь малозаселенные площади – даже в больших городах – так как плотность населения быстро снижается в направлении к периметру. Следовательно, согласно настоящим результатам, относительно небольшое число маломощных зарядов, примененных по густонаселенным городским центрам, может привести к примерно тем же потерям, что имели бы место при полномасштабной контрсиловой войне.

При наших расчетах мы предполагали, что целями ядерных ударов станут наиболее населенные центры в каждой стране. Сценарии с преднамеренным нацеливанием ядерных ударов по таким центрам, по крайней мере, в случае эскалации военной враждебности между странами, могут быть оспариваемы по нескольким причинам. Во-первых, данное действие должно вызывать возмездие такого же рода. Кроме того, военные цели, и особенно ядерные объекты противника, должны казаться более важными при выборе действий в подлинной военной ситуации. С другой стороны, быстрое и интенсивное нападение на города должно вызывать наибольший ущерб для вражеского государства. Соединенная с ударами по военным целям, атака по городам представляет собой вид тотальной борьбы, предназначенной для нанесения долговременного урона оппоненту. В этом смысле, сценарии «маленькой» войны, предполагаемые здесь, подобны, если не по масштабу, то в принципе, стратегиям всеобщей ядерной войны и противоборства, принятым сверхдержавами в середине 20-го столетия в контексте концепции «взаимного гарантированного уничтожения» (mutual assured destruction - MAD). Также возможно, что страна, не имеющая достаточно оружия для поражения всей военной инфраструктуры оппонента с целью предотвращения удара возмездия, может выбрать целями своего удара именно городские регионы, чтобы причинить максимальный ущерб. Этот аргумент предполагает, что наиболее опасная фаза в процессе распространения (ядерного оружия – В.Я.) может наступить тогда, когда какое-то государство только начинает становиться обладателем ядерного оружия. Такие новые ядерные страны более вероятно могут нацеливать свое оружие по городам и более вероятно применять его первыми, если они не уверены, что могли бы выжить в случае упреждающей атаки оппонента.

Ниже рассматривается ядерная война, в которой каждая из двух противоборствующих сторон взорвала 50 зарядов по 15 Кт. В этом случае общая мощность взрывов составляет 1,5 Мт, т.е. примерно 0,1%, или менее, от совокупной мощности предполагаемой в предшествующих сценариях полномасштабной ядерной войны, упомянутых выше. Такой сценарий согласуется с потенциальными арсеналами наименьших из признанных ядерных государств – Индии и Пакистана. Можно доказывать, что этот сценарий сегодня неправдоподобен, поскольку Индия и Пакистан должны были бы иметь весь свой арсенал, при-

стыкованный к носителям, и обладать самими этими носителями достаточно высокого класса, способными обеспечить доставку и подрыв 50 ядерных боезарядов на территории оппонента. Однако, другие ядерные государства имеют намного больше оружия и совершенных средств доставки, которые они могли бы использовать для подобной атаки. Кроме того, если страны уже начали создавать ядерное оружие, они имеют тенденцию продолжать строить свои арсеналы. К примеру, Индия может продвигаться вперед к арсеналу, сравнимому с теми, что имеют Китай, Великобритания и Франция [Norris и Kristensen, 2005d]. Северная Корея обладает реакторами, на которых, в случае завершения их доработки и запуска в действие, можно было бы производить достаточно расщепляющихся материалов для создания 50 боезарядов ежегодно [Norris и Kristensen, 2005d]. Планирует ли иметь такой реактор Пакистан, неизвестно, но Индия недавно подписала договор с Соединенными Штатами, позволяющий ей продолжение производства расщепляющихся материалов, при этом - без осушествления внешнего мониторинга. Многие страны, перечисленные в таблице 2, имеют достаточно урана и/или плутония для производства очень большого количества оружия. Таким образом, рассматривая сценарий с вовлечением двух стран и использованием каждой из них по 50-ти маломощных боезарядов, мы находимся в рамках диапазона арсеналов как сегодняшних наименьших ядерных государств, так и тех стран, которые могли бы получить такие арсеналы в недалеком будущем.

В таблицах 6 и 7 представлены наши оценки количества смертей и ранений при ударах 50-ти 15-килотонных зарядов по главным населенным центрам в ряде стран. Общее число погибших колеблется в таблице 6 от 2-х миллионов 600 тысяч до 16-ти миллионов 700 тысяч человек. Атака против Индии, например, должна была бы привести к намного большим потерям, чем подобное же нападение на Пакистан, т.к. в Индии больше густонаселенных центров.

В большинстве наших расчетов цели ударов сосредоточены в пределах крупных мегаполисов воюющих стран. Так, из рисунка 4 видно, что при условии нацеливания ударов 15-килотонными зарядами по 50-ти наиболее населенным центрам, в Японии 28 таких целей расположены внутри региона Токио-Иокогама. По нашему сценарию, как показано на рисунке 5, во многих странах половина всех смертельных исходов приходится на единственный мегаполис.

На рисунке 6 показано, что в большинстве стран потенциальное количество погибших распределяется между 50-тью целями относительно равномерно, так что оно не сильно зависит от выбора целей. Например, для Индии и Китая, число погибших при поражении 19-ти наиболее крупных и очевидных целей составило бы примерно половину от полного числа жертв в результате атаки по всем 50-ти целям.

Потери, указанные в таблице 6 при атаке 50-тью боезарядами по США, соизмеримы с теми, что ранее прогнозировались для варианта ограниченного или контрсилового удара с применением 3000 боезарядов общей мощностью 1300 Мт [ОТА, 1979; Daugherty и др., 1986]. Отнесенные к общей выходной мощности, потери на одну килотонну в 100 раз выше в сценарии с «маленьким» оружием, даже по сравнению с полномасштабным сценарием нападения на города, рассмотренным в прошлых сценариях [Harwell, 1984]. Высокий уровень потерь при маломощных зарядах не связан с каким-либо феноменом нелинейности. Скорее, более низкий результат в пересчете на одну килотонну в случае большого числа мощных зарядов можно объяснить наличием в их числе тех, что нацелены на пригороды и изолированные военные цели, а также тем, что часть боезарядов применяется с запланированным перекрытием некоторых зон поражения (наложение ударов – В.Я.). В таблице 6 также показано, что региональный обмен ударами между Индией и Пакистаном, в котором каждая сторона применяет 50 боезарядов, мог бы привести к более, чем 21 миллиону погибших, что эквивалентно примерно половине глобального числа жертв второй мировой войны (WW-II). Только малого числа боезарядов достаточно, чтобы привести в конкретно взятом государстве к таким потерям, которые оно понесло в течение WW-II или в других главных войнах истории. Так, три 15килотонных боезаряда, взорванные в США, могли бы вызвать жертвы, превышающие те, что страна имела за всю WW-II.

Неопределенности, рассмотренные в разделе 3 применительно к отдельным целям, характерны и для войны регионального масштаба. Как правило, мы полагаем, что наибольшие неопределенности имеют место по вопросам нацеливания, а также в отношении таких условий, как время суток в момент атаки и эвакуация населения перед нападением. Значительными неопределенностями для региональной войны являются число и мощность примененных боезарядов, и выбранные для удара цели. Как показано на рисунке 6, для 50-ти наиболее населенных регионов в каждой стране количество погибших зависит почти линейно от числа взорванных боезарядов.

## 5. Радиоактивные осадки (fallout)

В предыдущих исследованиях полномасштабной ядерной войны радиоактивные осадки были существенным источником потерь. Например, Harwell [1984] предсказывал, что около 25% наземной территории Соединенных Штатов должно быть подвержено долговременной смертельной дозе радиации, приводящей к гибели от 50 до 70 миллионов человек в дополнение к тем, которые умрут от прямого воздействия таких факторов, как ударная волна взрыва. Радиоактивность связана преимущественно со взрывами на поверхности, которые обычно планируется применять для поражения «укрепленных» или заглубленных военных целей, таких, как ракетные шахты. Однако поверхностные взрывы обычно вызывают меньшие ударную волну и пожары. Harwell [1984], к примеру, нашел, что когда взрывы в городах производятся у поверхности, общее число потерь снижается на 10 миллионов человек.

Существует множество исследований раннего (или первичного – В.Я.) выпадения радиоактивных осадков (далее – fallout, В.Я.) после ядерных взрывов у поверхности, и возможности подвергнуться излучению, особенно воздействию гамма-лучей, испускаемых остаточными радионуклидами. Первичные fallout состоят из пылевидных радиоактивных побочных продуктов, выпадающих на землю в течение первого дня, или около этого, после поверхностного взрыва. Поверхностные взрывы поднимают большое количество пыли, которая переносит большинство из коротко живущих радиоактивных изотопов, высвободившихся при реакции расщепления. Модель последующего fallout зависит, среди других факторов, от распределения размеров частиц пыли, высоты устойчивых облаков из осколков, и местной погоды. Обычно, как обсуждается ниже, предполагается, что первичного fallout не будет, пока нет дождя. Вообще, большинство летальных осадков от небольших поверхностных взрывов (15 Кт) происходит в течение одного – двух часов после взрыва, и в пределах нескольких десятков километров от эпицентра. Кроме того, в радиусе двух-трех километров от взрыва угроза подвергнуться воздействию радиоактивных осадков вторична по отношению к опасностям, связанным с быстрым излучением (создаваемым в

момент взрыва), взрывной волной и тепловым импульсом. Поскольку последние воздействия были нами прямо использованы при построении кривых, обсуждавшихся выше, мы не будем здесь заботиться о детальном моделировании влияния *fallout* на расстояниях, меньших одного или двух километров от эпицентра (хотя обсуждаемая ниже модель будет грубо учитывать эти осадки).

Учитывая сложность проблемы *fallout* и чувствительность к таким параметрам, как скорость ветра, дождь и размер частиц пыли, которые не могут быть определены заранее, мы использовали упрощенную модель радиоактивных осадков, предложенную Glasstone и Dolan [1977] для подсчета площадей при заданных уровнях воздействия по ветру *(downwind)* при контактном наземном взрыве.

Используя указанную модель, мы взяли параметры по норме облучения, интегрированной дозе и ветру для случая 15-килотонного наземного взрыва, приведенные в таблице 9.93 и на рисунке 9.26 [Glasstone и Dolan, 1977]. Результаты обобщены нами на рисунке 7 через возможную дозу, полученную при наружном воздействии гамма-лучами после нахождения в течение 48 часов в зоне поражения на совершенно ровной поверхности, как функцию от расстояния от места взрыва. Эти результаты должны уточняться при наличии местности других типов и убежищ, что будет рассмотрено ниже. Обычно, 50-60% общего количества радиоактивности, образующейся при поверхностном взрыве, выделяется в виде первичных *fallout*, и этот фактор учтен в модели [Glasstone и Dolan, 1977; Shapiro и др., 1986].

В модели [Glasstone и Dolan, 1977] предполагается наличие устойчивого ветра со скоростью 24 км/час и с минимальным сдвигом (*wind shear* – отклонение ветра от основного направления, В.Я.). Мы берем ветер, дующий прямо на восток, как превалирующие западные ветры (westerlies – весты). Задержка в выпадении радиоактивных осадков, связанная с их перемещением и определяемая как время их прибытия на заданное место, находится через известные расстояние до эпицентра и скорость ветра. Доза облучения от *fallout* спадает пропорционально t<sup>-1.2</sup>, где t – время, измеряемое в соответствующих единицах [Glasstone и Dolan, 1977]. При заданном времени прибытия и двухдневном интервале воздействия, «умножающий коэффициент» для дозы облучения может быть получен путем повременной интеграции норм облучения на всем этом интервале. Тогда действительная доза за 48 часов есть произведение эталонной нормы дозы облучения на умножающий коэффициент.

На рисунке 7а показана возможная максимальная доза облучения всего тела за 48 часов как функция от расстояния по ветру от места 15-килотонного взрыва. На рисунке 7b даны расстояния при встречном от эпицентра ветре до границ зоны с данной дозой облучения. Для удобства нашего анализа для результатов на рисунках 7а и 7b приведены соответствующие *power law* функции (*annpokcumaция с помощью степенной зависимости, или степенная annpokсимация* – В.Я). Доза облучения вне убежища для любого расстояния прямо по ветру от эпицентра поверхностного взрыва может быть с приемлемой точностью определена с использованием отношения

$$D = 266\ 000\ /\ L^{1.838} \tag{2}$$

где D есть обобщенная доза облучения в радах, а L – расстояние от эпицентра в километрах. Отметим, что равенство (2) может быть инвертировано, чтобы найти максимальное расстояние по ветру для любой заданной дозы облучения D. В своей упрощенной модели Glasstone и Dolan [1977] также предсказывают, что, для случая 15-килотонного *fission explosion* (т.е. взрыва с реакцией расщепления – В.Я.), ширина зоны с данной дозой облучения почти не зависит от расстояния до места взрыва. Следовательно, мы далее предполагаем, что для индивидуальной дозы ширина зоны, W (км), остается постоянной на всем диапазоне, принятом в равенстве (2). Применительно к рисунку 7b это дает ширину зоны

$$W = 40 / D^{0.5486}$$
(3)

На основании сделанных выше предположений, отпечаток получаемой зоны воздействия первичного *fallout* от 15-килотонного поверхностного взрыва имеет вид вытянутого к востоку от эпицентра прямоугольника L x W, с расчетом этих сомножителей по формулам (2) и (3).

Для рассматриваемых здесь сценариев, расчетные населенные ячейки обычно сопоставимы или больше по ширине, чем те зоны воздействия, в которых предполагается летальный исход. Кроме того, в сценариях с многократными взрывами, зоны облучения часто перекрываются. Когда нам надо оценивать воздействие в суб-расчетных ячейках, мы полагаем, что плотность населения в них равномерна, так что количество людей, подвергшихся облучению, прямо пропорционально соответствующей части зоны. Мы также суммируем воздействия в перекрываемых зонах. Например, на рисунке 8а показаны 48-часовые воздействия, предсказанные для индивидуумов вне убежищ в мегаполисе Токио-Иокогама в случае атаки 50-тью боезарядами против Японии. Заметим, что при такой атаке имеется много перекрываемых областей, где *fallout* происходит неоднократно, и общее воздействие слагается из отдельных составляющих.

Следуя Daugherty и другим [1986], мы предполагаем, что 50% населения будет иметь убежища с коэффициентом 3 (т.е. эффективностью защиты – В.Я.), а другие 50% - с коэффициентом 10. Следовательно, истинная степень воздействия должна оцениваться через D/, и тогда D/=D/3 или D/10. Возможная реакция людей на данное сильное (48-часовое) облучение всего тела неопределенна. Доза, при которой гибнет до 50% облученных, по данным разных исследований лежит между 220 и 450 рад [Daugherty и др., 1986]. Мы взяли для нашего анализа 450 рад. Далее, опираясь на исследование [Daugherty и др., 1986], мы предположили, что кривая фатальных исходов линейна по отношению к дозе облучения, и что при дозе в 600 рад гибнет 100% облученных, а при дозе в 300 рад - 0%. Тогда доля погибших для заданного сильного облучения (выше 300 рад) будет:

$$\alpha_{\text{radiation fatality}} = (D' - 300) / 300; \qquad 0 < \alpha < 1 \tag{4}$$

Дозы радиоактивного облучения в формуле (4) модифицированы так, чтобы учесть эффект укрытий. Поэтому летальная доза облучения (только от воздействия радиоактивных осадков) при отсутствии убежищ составляет 900 рад для 50% населения, подвергшегося воздействию, и 3000 рад для остальной части населения.

При этих параметрах радиоактивные осадки от 15-килотонного поверхностного взрыва могли бы стать летальными для всех людей, выживших после воздействия ударной волны и пожаров в пределах зоны, простирающейся по ветру полосой с длиной примерно 8 км и шириной 350 м. На расстояниях более 22 км от эпицентра будет небольшое число погибших от этого фактора, хотя значительное число людей, получивших дозу в 100-300 рад, настигнет лучевая болезнь (и, потенциально, это будет обостряться другими стрессами, как и отсутствием организованной медицинской помощи). Между эпицентром взрыва и 22-м километром должны быть зоны различных размеров, в которых часть населения подвергнется летальному облучению. Например, темно-фиолетовые области на рисунке 8b для сценария атаки на мегаполис Токио-Иокогама означают объекты со значительным числом потерь от первичного *fallout*.

Влияние дождей на fallout рассмотрено в источниках достаточно ограниченно. Так есть частично потому, что наиболее мощные боезаряды поднимаются и стабилизируются в атмосфере гораздо выше тех уровней, где развиваются дожди. Однако, устойчивая высота облака из обломков при 15-килотонном воздушном взрыве составляет около 6000 м, что соответствует уровню средней тропосферы [Glasstone и Dolan, 1977]. Высота грибовидного облака над Нагасаки была оценена в 4-5 км, при основании около 1200-1300 метров [Ishikawa и Swain, 1981]. Из этого следует, что 15-килотонное устройство изначально выделяет свою радиоактивность на уровне ниже средней тропосферы. В таком случае возможно быстрое удаление, если атмосфера нестабильна и в данном регионе случаются дожди. По этой причине, ядерные испытания в атмосфере выполнялись в удаленных местах, частично для того, чтобы избежать влияния местных дождей [Glasstone и Dolan, 1977]. Природные осадки могут выдувать радиоактивные осколки из султана ядерного воздушного взрыва в такой же самой степени, как сухое осаждение удаляет радиоактивность из облака наземного взрыва. Кроме того, дождь, возможно, мог бы приводить в определенном месте к удвоению радиоактивности, образующейся при воздушном взрыве, по сравнению с наземным взрывом в сухую погоду, поскольку в последнем случае только около половины радиоактивности приходится на частицы с размерами, достаточными для образования первичного fallout.

Для рассматриваемых здесь сценариев, в таблицах 4 и 6 даны оценки числа погибших из-за первичных *fallout* от единичного и множественных наземных взрывов в отсутствие дождей. В то время, как потери от облучения являются в указанных случаях существенными, общее число погибших от ударной волны, пожаров и радиации для наземных взрывов вообще несколько ниже, чем прямые потери при воздушном взрыве эквивалентной мощности. Дожди способны значительно увеличивать число погибших от радиации.

Задержанное (delayed), в противоположность первичному, выпадение радиоактивных осадков обычно происходит через один - два дня после ядерного взрыва, и простирается по ветру намного дальше от эпицентра. Fallout в глобальном масштабе связано, главным образом, с применением высоко-мощных боезарядов, чья радиоактивность изначально вбрасывается в стратосферу, и затем медленно удаляется над всем земным шаром. Fallout средней величины имеет место в отдельных регионах при сохранении радиоактивных осколков, захваченных в тропосфере. До того, как ядерные испытания были запрещены договором, в мире было взорвано около 500 ядерных устройств с общей мощностью более 400 Мт. Что более уместно отметить здесь, 100 воздушных взрывов, в среднем по 10 Кт каждый, было выполнено на полигоне в Неваде. Каждое из 61 такого устройства выделяло при взрыве энергию, которой было достаточно, чтобы можно было измерять радиоактивность за пределами полигона [Воиville и др., 2002]. Испытания умышленно проводились в сухих местных условиях, чтобы осколки оставались наверху так долго, как возможно, распадаясь и рассеиваясь до того, как они упадут на поверхность. Порой, из-за влияния дождей появлялись высокорадиоактивные точки, такие, как в северном штате Нью-Йорк. В Соединенных Штатах, полное совокупное внешнее воздействие на население, связанное со взрывами 100 маломощных ядерных устройств на полигоне в Неваде, было сравнимо с глобальным *fallout* от испытания большого 400-мегатонного оружия [Bouville и др., 2002]. Меньшие заряды были более эффективными в расчете на единицу выходной мощности, т.к. при реакции расщепления кратко-живущие радиоизотопы выделялись намного быстрее [Bouville и др., 2002]. Радиоактивный осколок от более мощного заряда вбрасывался в стратосферу, где он в значительной степени распадался прежде, чем упасть на землю. В округах по ветру от невадского полигона было отмечено воздействие со средним значением 300 миллирад [Bouville и др., 2002], что сравнимо со средней годовой дозой облучения от природной (фоновой - В.Я.) радиации.

В региональной ядерной войне дозы радиации над большими площадями должны, вероятнее всего, превышать те, что имели место в ходе испытаний на полигоне в Неваде. В первом случае, взрывы происходили бы, скорее, одновременно, чем в течение десятилетия, и на одной и той же ограниченной территории. Кроме того, в рассматриваемых здесь регионах дожди более вероятны, что могло бы значительно обострить создаваемую местную и региональную радиоактивность. Результаты расчетов fallout, приведенные на рисунке 8a, показывают, например, что на большей части территории Токио, и в полосе, протянувшейся более, чем на 100 км от него по ветру, люди, находившиеся вне убежищ в течение 48 часов, получили бы дозу облучения от 50 до 200 рад. В этой же самой зоне, совокупная доза за период между первым днем и концом шестого месяца составила бы примерно половину от облучения за 48 часов (после взрыва, В.Я.) - все еще очень существенную величину воздействия, эквивалентную, возможно, тысячекратному фону. При таких обстоятельствах, вероятно, что внутри городского комплекса осталась бы только небольшая часть населения, занятая, главным образом, ликвидацией последствий бедствия и выполнением мер гражданской обороны.

Наиболее вероятно также, что неорганизованная эвакуация десятка миллионов людей в течение дней и недель из мегаполиса была бы хаотичной и вела бы к дополнительному количеству погибших и раненых. Экономическое влияние факта покидания населением главного коммерческого центра имело бы национальное и международное измерения. Невероятно, чтобы люди могли вернуться сюда годами, вследствие чего они были бы вынуждены искать другие места для постоянного проживания. Уроки в данном отношении дали нам недавние природные бедствия, такие как цунами в Индонезии в 2004 году и ураган «Катрина» в 2005-м. Хотя оба эти бедствия были ограничены береговыми областями, они имели далеко идущие долговременные последствия. Например, за шесть месяцев после событий «Катрины» Соединенные Штаты потратили десятки миллиардов долларов на помощь пострадавшим и восстановление разрушенного, но вряд ли сумели добиться за этот срок, чтобы сильно пострадавший и покинутый жителями Новый Орлеан снова стал годным для жилья городом. Хотя мы не расширяли наши прогнозы потерь и ущерба за счет включения в расчеты медицинских, социальных и экономических влияющих факторов, следующих за самими взрывами, такие исследования выполнялись в прошлом для сценариев полномасштабной ядерной войны [Harwell и Hutchinson, 1989]. Такой анализ следует провести также и для рассматриваемых здесь сценариев и физических результатов.

В то время, как война между странами с маленькими арсеналами вряд ли вызовет такие региональный и глобальный *fallouts*, которые приведут к большому числу погибших [Glasstone и Dolan, 1977], намного более вероятно то, что

большие городские зоны вокруг целей ударов будут насовсем покинуты людьми, особенно после наземных взрывов, или же после воздушных взрывов в условиях дождливой погоды. Ядерный взрыв освобождает множество кратко- и долго-живущих нуклидов, насчитывающих грубо до 30 000 МСі на одну килотонну мощности реакции расщепления за одну минуту после взрыва [Glasstone и Dolan, 1977]. Так что, эвакуацию населения необходимо проводить немедленно после ближайшего поверхностного взрыва. Однако, выделение долгоживущих радиоизотопов, как это было после инцидента на Чернобыльском ядерном реакторе в апреле 1986 года, делает скорое восстановление и ре-колонизацию в зараженных зонах невозможными. При аварии в Чернобыле высвободилось около 2,5 MCi изотопа <sup>137</sup>Cs и 0,27 MCi <sup>90</sup>Sr [Nuclear Energy Agency, 2002]. Для сравнения, 50 ядерных взрывов по 15 килотонн, как предполагается, дали бы цифры в 0,2 MCi <sup>137</sup>Cs и 0,14 MCi <sup>90</sup>Sr, но с периодом полураспада обоих изотопов, близким к 30 годам. Особенно отметим, что местное воздействие, вызванное чернобыльским инцидентом, было смягчено благодаря маленьким размерам выброшенных из реактора частиц, и основная часть радиоактивности рассеялась на больших расстояниях, несмотря на то, что первичный fallout должен был бы сконцентрировать ее на месте аварии. Тем не менее, сразу после чернобыльской аварии, было эвакуировано население из региона размером 2800 км<sup>2</sup>, что превышает общую площадь, подвергаемую воздействию ударной волны взрыва в рассматриваемых нами сценариях. Ряд других «горячих» радиоактивных точек имел место внутри зоны в несколько сотен километров от Чернобыля, там, где прошли дожди. В целом, 3100 км<sup>2</sup> было заражено изотопами <sup>137</sup>Cs на уровнях выше 40 *Ci*/км<sup>2</sup>, 7000 км<sup>2</sup> на уровнях между 16 и 40 *Ci*/км<sup>2</sup>, и 103 000 км<sup>2</sup> между 1 и 5 *Ci*/км<sup>2</sup> [Nuclear Energy Agency, 2002]. В конечном итоге, Советский Союз установил верхний предел заражения земной поверхности в 40 *Ci*/км<sup>2</sup> изотопов <sup>137</sup>Cs как критерий для решения о постоянном переселении населения, и 15-40 Сі/км<sup>2</sup> для временной смены им места жительства. В последней из указанных зон потребление зараженной пищи остается под жестким контролем; 193 000 человек, живущих здесь в 1995 году, получили годовую дозу облучения ниже 500 миллирад (из которых 300 миллирад есть средняя годовая доза, полученная от природной фоновой радиации) [Nuclear Energy Agency, 2002]. Спустя шестнадцать лет после аварии, 4000 км<sup>2</sup> сельскохозяйственной земли оставались покинутыми, включая всю площадь в радиусе 30 км от реактора. В соответствии с рассматриваемыми нами сценариями ядерной атаки, относительно меньшие площади должны быть покинуты или взяты под жесткий контроль, хотя эти области будут располагаться внутри сегодняшних больших городских центров, либо рядом с ними. Соответственно, размеры ущерба в результате воздействия на население и экономические объекты будут меньше, чем в случае Чернобыля.

Неопределенность в расчетах воздействующей радиоактивности при взрыве 50-ти зарядов по 15 килотонн обусловлена колебаниями таких условий, как скорость местного ветра и тем, шел ли дождь во время взрыва. Однако наибольшая неопределенность состоит в вопросах нацеливания ударов, в частности - использовались ли удары наземного типа. Количество погибших от воздействия *fallout* зависит от того, как население использовало укрытия, и как быстро оно могло быть эвакуировано из данного региона.

### 6. Выбросы дыма

В начале 80-х годов в многочисленных исследованиях выбросов дыма от горящих городов предполагалось, что после ядерной войны последуют глобальные климатические изменения [Alexandrov и Stenchikov, 1983; Turco и др., 1983; Pittock и др., 1989; Turco и др, 1990]. Климатические изменения могли бы воздействовать и на другие страны мира, не вовлеченные в конфликт, и, возможно, вели бы к значительным глобальным потерям. В то время большие климатические эффекты предсказывались для случая с применением 100 зарядов большой мощности по 100 городам, но тогда такой сценарий не казался вероятным из-за большого количества находящегося в наличии ядерного оружия. Здесь мы оцениваем дым, образующийся при применении 100 низко-мощных зарядов по 100 целям, многие из которых могут быть соединены в единый мегаполис. В исследовании Robock и др. [2006] оцениваются климатические изменения, которые могут произойти вследствие образования этого количества дыма.

Не совсем практично использовать сегодняшнюю ограниченную информацию по использованию земель в сотнях городских комплексов по всему миру для точного определения местного и регионального распределения горючих материалов, которые могли бы воспламениться при ядерных взрывах. Чтобы оценить в настоящей работе fuel loadings (будем называть это далее иногда топливными нагрузками – В.Я.), мы приняли основное предположение, что внутри городских зон имеется прямое соотношение между количеством доступного горючего и местной плотностью населения. Свой вклад в изобилие горючего вносят жилища, офисы, промышленные предприятия и инфраструктура, включающая школы, транспорт, склады горючего, торговые центры и т.д. Зная соотношение между fuel loading и плотностью населения, мы можем использовать плотность населения в качестве заменителя для оценки данных по fuel loading. В следующем разделе мы обсуждаем соотношение между этими двумя параметрами, так же, как и другими показателями, необходимыми при нахождении размеров выброса дыма. Затем мы говорим о высоте, на которую столбы дыма могут подниматься. И потом применяем этот метод для определения выброса дыма при атаках против ряда городов и стран.

## 6.1. Оценка fuel loading и выбросов дыма

Мы следующим образом оцениваем массу углеродосодержащего дыма (часто называемого элементарным углеродом, или сажей), образуемого вследствие пожаров, вызванных единственным взрывом в конкретном месте:

$$M_e = \sum_{j=1}^{J} P_j A_j \left\{ M_f \left( \sum_{i=1,n} F_i Q_i S_i C_i \right) R \right\}$$
(5)

Здесь  $M_e$  есть общая масса возможного выброса дыма. Внешняя сумма, по j, берется за все расчетные ячейки в регионе, подвергнутом воздействию взрыва или пожару. Pj – это плотность населения (человек/км<sup>2</sup>) внутри расчетной ячейки j, которая может быть взята из соответствующей базы данных о населении для данной области (LandScan, 2003). Aj означает площадь расчетной ячейки, или часть области, подверженную пожару. При суммировании мы объ-

единяем все *J* расчетных ячеек, расположенных симметрично вокруг эпицентра таким образом, что общая область, подожженная вследствие 15-килотонного взрыва, равна 13 км<sup>2</sup>, что эквивалентно происшедшему в Хиросиме [Glasstone и Dolan, 1977].

Выражения внутри скобок в данном случае не изменяются с расстоянием от эпицентра. Ключевой параметр M<sub>f</sub> представляет собой унифицированную массу горючего топлива всех типов на душу населения для данной страны и конкретно взятого места. На практике, мы берем этот стандарт для развитого мира применительно к 1980 году, и масштабируем его для других условий (см. ниже). В прошлом, для определения унифицированного количества топлива применялось два метода. Turco и др. [1990] анализировали общие количества различных типов горючих материалов, которые производились и использовались ежегодно в развитых странах. Затем, с учетом уместного времени существования каждого вида горючего материала (в годах), определялось общее количество топлива. Наиболее общирная информация об этом относится к 80-м годам. Общее количество всех видов топлива в развитом мире на то время оценивалось равным 11,4  $\pm$  3,6  $\times$  10<sup>3</sup> Tg (teragram, или 10<sup>12</sup> грамм = 10<sup>6</sup> метрических тонн), где диапазон означает вероятные минимальное и максимальное значения. При делении этой массы топлива на общее число населения в развитом мире на 1980 год – около 1,1 x 109 человек - было получено усредненное значение  $M_f = 1,1 \pm 0,4 \times 10^7$  грамм/чел.

Альтернативный подход для нахождения *M<sub>f</sub>* был предложен в исследованиях Small [1989] и Bush и др. [1991]. Они проанализировали использование территории земли в поперечном сечении американских городов, и обобщенные данные по количеству горючих материалов в типовых структурах, включая различные типы жилых, промышленных и деловых объектов. По результатам их анализа общее количество топлива в американских «городских зонах» составило около 1322 Tg. Конкретно, зоны ударов были разделены, исходя из особенностей сценария атаки, который предусматривал применение сотен боезарядов мегатонного класса. Однако, Small [1989] не определял число человек, подверженных воздействию внутри атакуемых городов, а констатировал более широко, что половина общей городской и пригородной территории Соединенных Штатов находится в зонах возможных целей ударов. При общем числе городского населения США в 1980 году (152 миллиона человек), низшая граница количества топлива на душу населения должна, следовательно, быть 8,7 × 10<sup>6</sup> грамм/чел. Предполагая, что половина населения жила в то время в зонах возможных ударов, получаем, что подразумеваемое количество топлива на душу населения там было равно 1,7 × 107 грамм/чел. Эти результаты стоят примерно в одном ряду с диапазоном, полученным Turco и др. [1990]. Соответственно, мы приняли за норму  $M_f$  величину 1,1 × 10<sup>7</sup> грамм/чел. Позже мы вернемся к вопросу о современных *fuel loadings* и горючих материалах в других частях мира.

В равенстве (5)  $F_i$  есть доля каждого типа или категории горючего материала *i* в общем количестве топлива (см. таблицы 8 и 9).  $Q_i$  представляет собой долю топлива, которая предполагается воспламенившейся в результате взрыва, а  $S_i$  означает средний коэффициент эмиссии элементарного углерода из топлива соответствующего типа (таблицы 8 и 9). Чтобы учесть при оценке выбросов дыма отличия в характеристиках топлива в разных странах, введен параметр  $C_i$ , который отражает отношение удельного количества топлива на душу населения в рассматриваемой стране к такому же показателю в развитом мире на 1980 год. Наконец, чтобы оценить удаление дыма «черными дождями», вызванными ог-

невыми бурями от взрыва, имеется коэффициент R – средняя доля созданного элементарного углерода, которая не удаляется из конвективных столбов, образуемых пожарами; норма этого параметра установлена здесь на уровне 0,8 (см. ниже).

Предположив на минуту С и Q равными единице, находим, что в равенстве (5) значение выражения в скобках – с данными из таблицы 8 – составляет величину 0,016 грамм (дыма)/грамм (топлива) [Тигсо и др., 1990]. При альтернативном подходе, с использованием данных из таблицы 9, получается величина 0,020 грамм (дыма)/грамм (топлива) [Small, 1989]. Важное различие между этими двумя оценками состоит в доле топлива категории дерева и продуктов из дерева. Более утонченная разница определяется тем, что Turco и др. [1990] оценивают массу сажи, создаваемой пожарами, в то время как Small [1989] дает общее количество дыма, в котором сажа есть лишь компонент. Сравнивая конкретные absorptivities, или степени поглощения в поперечном разрезе на единицу массы, через показатель м<sup>2</sup>/грамм (дыма, *или сажи – В.Я.*), мы определяем, что Turco и др. [1990] использовали величину 7 м<sup>2</sup>/грамм (сажи), тогда как Small [1989] допускал 4,4 м²/грамм (дыма). Эти цифры лучше нормируются, если от конкретной *absorptivity* перейти к коэффициенту поглощения на единицу массы сожженного топлива (т.е. объединяя коэффициент эмиссии и конкретную поглощающую способность). Тогда получаем у Тигсо и др. [1990] величину 1,1×10<sup>-1</sup> м<sup>2</sup>/грамм (топлива), а у Small [1989] – 8,6 ×10<sup>-2</sup> м<sup>2</sup>/грамм (топлива). Эти два значения разумно согласуются между собой. В последующих параграфах мы рассматриваем альтернативные величины для Mf и C.

Чтобы выразить зависимость fuel loading от плотности населения, мы применили линейное соотношение, которое на рисунке 9 показано сплошной линией. Это соотношение согласуется с основным значением удельной массы топлива  $M_f = 1,1 \times 10^7$  грамм/чел., распределенного над территорией в 1 км<sup>2</sup> (10<sup>10</sup> см<sup>2</sup>), с наклоном данной прямой линии под углом в 0,0011 грамм/см<sup>2</sup> на чел./км<sup>2</sup>. На рисунке 9 также дано сравнение основной модели с несколькими другими оценками топливной нагрузки относительно плотности населения. Bush и др. [1991] исследовали конкретные vcpeдненные fuel loadings в 6 регионах Соединенных Штатов, основываясь на моделях использования городской территории (urban land-use patterns) и назначая fuel loadings согласно стандартным категориям из этих моделей. Bush и др. [1991] также предоставили данные о плотности населения в каждом из этих регионов. Мы полагаем, что эти данные приемлемы для примерно 50% из наименьших городских территорий, взятых ими при определении fuel loadings. На рисунке 9 их результаты показаны желтыми символами. После калибровки по населению, мы вывели линейную регрессию для fuel loading в сравнении с данными о плотности населения. Эта регрессия дает для ненаселенной территории значение fuel load*ing*, pabhoe 0,8  $rpamm/cm^2$ , что примерно согласуется с фоновым уровнем для растительных видов топлива в городских и жилых зонах, предложенных в исследовании Bush и др. [1991]. Из-за этого усредненного фонового топливного компонента, средняя fuel loading, полученная в Bush и др. [1991], при наименьших плотностях населения выше (примерно на 40-60%), чем в основной модели рисунка 9. В нашей работе фоновая растительность игнорируется, чтобы сохранить линейный характер зависимости в рисунке 9. Показанная на этом рисунке пунктирная линия есть экстраполированная регрессия, соответствующая данным в Bush и др. [1991], которая иллюстрирует изгиб кривой для мало населенных областей по причине вклада фонового топлива. Важно, что две модели fuel loading дают примерно одинаковые значения (с отклонением в пределах ± 10%) при более высоких плотностях населения, типичных для центров мегаполисов.

Для случаев, рассматриваемых в работе Bush и др. [1991], средние значения fuel loading относительно низки. Это может объясняться по большей части тем, что Bush и др. [1991] стремились найти такие характерные размеры этого параметра, которые были бы применимы к сценариям взрывов ядерных зарядов большой мощности над типичными, средней величины американскими городами, такими, как Нэшвилл (Nashville) и Теннесси (Tennessee). След воздействия оружия большой мощности покрывает области, далеко удаленные от центра города. Следовательно, с точки зрения значения площадей, среднее значение fuel loading, вероятно, доминирует в сторону низких величин в необитаемых районах вокруг городов, и в жилых зонах. Подобным образом, для зон прицеливания, связанных со взрывами большой мощности, следует ожидать низкую среднюю плотность населения. Например, взрыв мощностью 150 Кт способен поджечь площадь в 100 км<sup>2</sup>, которая будет, вероятно, включать обширные пригородные пространства с низкой плотностью населения, особенно в американских городах меньшего размера. Но, несмотря на то, что в таких случаях средние значения плотности населения и fuel loading должны склоняться к низким уровням, тем не менее (в ряде мест – B.Я.) fuel loading на душу населения может, в действительности, оказаться выше даже без учета фонового фактора растительности, из-за большей площади следа взрыва, связанного с жилой собственностью. Важно заметить, что когда Bush и др. [1991] рассматривали районы с более высокой плотностью населения, предсказываемые уровни fuel loading были намного выше, достигая, например, 9 грамм/см<sup>2</sup> в районе Нэшвилла. Это говорит о том, что при меньших по мощности взрывах, произведенных в городских центрах, можно ожидать воспламенения горючего с более высокими densities (плотностями распределения), чем в среднем для случаев применения зарядов большей мощности.

Simonett и др. [1998] анализировали количество топлива в Сан-Хосе (San Jose), Калифорния. Документально зафиксировав количество и типы строений, и использовав взятые из источников показатели по количеству топлива для каждого из этих типов, они получили внутри границ города значение *fuel loading* на уровне 0,94 грамм/см<sup>2</sup>. В этом анализе авторы пренебрегли некоторыми типами топлива, такими как нефть на складах и асфальтовые покрытия, но оценили возможную общую топливную нагрузку в 1,34 грамм/см<sup>2</sup>. В свою очередь, мы, используя данные о населении в Сан-Хосе в 1980 году (629 246 человек) и площади города (440 км<sup>2</sup>), получили плотность населения в городе на то время, равную 1370 чел./км<sup>2</sup>. Тогда средняя для Сан-Хосе *fuel loading* опускается слегка ниже базовой кривой на рисунке 9.

Ряд исследователей определил топливные нагрузки для некоторых частей Гамбурга, который перенес большие пожары в ходе второй мировой войны (Рис. 9). Плотность населения в горевших районах города составляла грубо 20 000 чел./км<sup>2</sup> [Lucas и др., 1990]. Ebert [1963] приводит оценки, данные немецкими инженерами пожарной службы, по топливной нагрузке в одном районе центра этого города, как 32 грамма дерева/см<sup>2</sup>. По оценке SCOPE [Pittock и др. 1989] *fuel loading* составляла в Гамбурге 47 грамм/см<sup>2</sup>, а в материалах ОТА [1979] дается величина в 16 грамм/см<sup>2</sup>, хотя ни в одном из источников не указано происхождение этих величин. Schubert [1969] тщательно проанализировал топливную нагрузку по фактору дерева в районах Гамбурга с площадями 0,37 км<sup>2</sup> и 0,45 км<sup>2</sup>, получив соответственно значения в 16 грамм/см<sup>2</sup> и 12 грамм/см<sup>2</sup>. Ресzkis [1988] описал городской центр Дрездена во второй мировой

войне как скопление преимущественно 5-этажных жилых зданий, занимающих значительную часть земельной территории; для оценки степени возгораемости таких строений была использована средняя топливная нагрузка в 22 грамм/см<sup>2</sup>. Эта величина должна быть, вероятно, ниже, т.к. здесь не учитывались большие количества хранимого в городе каменного угля. Плотность населения не приводилась.

Подобные изучения проблемы топлива на основе модели использования земель не проводились для густонаселенных районов современных городов. Larsen и Small [1982] предположили для примерно 1980 года наличие трех типов характерных американских городов, в которых в зоне радиусом 2 км от центра топливная нагрузка составляла 23, 41 и 63 грамм/см<sup>2</sup>. На кольцеобразном пространстве, образуемом радиусами 2 и 6 километров от центра этих городов, топливная нагрузка оценивалась соответственно в 7, 11 и 18 грамм/см<sup>2</sup>. Для сравнения, среднее значение этого параметра по 50-ти городам США с высокой плотностью населения, которое мы получаем ниже, равно 12 грамм/см<sup>2</sup> (параграф 6.3). Эти результаты обеспечивают поддержку идеи исследования, в котором высокая средняя топливная нагрузка связана со сценариями взрывов ядерных зарядов небольшой мощности, нацеленных по населенным центрам.

Fuel loading на душу населения в развитом мире может быть больше, чем в мире развивающемся, поэтому значения C в равенстве (5) могут быть меньше единицы. Мы не нашли специального анализа топливной проблемы в крупных городах развивающихся стран. Однако, имеющегося доступного множества уместных косвенных данных в отношении больших городских регионов по всему миру достаточно для того, чтобы рассмотреть возможные расхождения в величине С. В таблице 10, например, для многих крупных городов сравниваются, в расчете на душу населения, данные по наличию собственных транспортных средств, а также количеству производимых твердых отходов [Decker и др., 2000]. Вероятно, что число используемых автомашин соотносится определенным образом с количеством нефти (нефтяных продуктов – В.Я.) на складах и в обращении. Эти данные показывают, что в крупных городах развивающегося мира число автомашин составляет в среднем 0,38 от их количества в мегаполисах развитого мира (исключая Los Angeles), со значительным перекрытием в специфических случаях. Подобно этому, количество создаваемого твердого мусора может как-то соотноситься с избытками бумаги, картона, пластика и других горючих материалов, включая определенные продукты питания, доступные в городских регионах. В городах развивающегося мира образуется примерно половина того количества отбросов, которое имеет место в мегаполисах развитых стран, и вследствие этого можно полагать, что fuel loading будет в первом случае соответственно ниже.

Используя усредненные по стране данные, можно недооценить истинную топливную нагрузку на душу населения в городах, т.к. городское население имеет, вероятно, больше богатства, собственности и ресурсов инфраструктуры, чем сельские жители. Это особенно справедливо для развивающихся стран, где в городских регионах проживает 40-60% населения, тогда как в развитом мире эта доля составляет 70-80% (на 2000 год, см. таблицу 11), несмотря на то, что города развивающегося мира растут намного быстрее. Для грубого сравнения относительной экономической активности и богатства в различных регионах мира может быть использован такой показатель как выброс двуокиси углерода на душу населения [Marland и др., 2005] (Таблица 11). Принимая для «развитого» мира средний выброс в 2 метрические тонны углерода на одного человека, и предположив, что доступ к топливу пропорционален выбросу углерода, мы получаем, что относительная топливная нагрузка на душу населения, или коэффициент C, в развивающихся странах, указанных в таблице 11, может лежать в диапазоне от 0,10 до 0,75, со средним значением 0,33. Однако, т.к. преобладающие выбросы CO<sub>2</sub> имеют место при расходе ископаемых видов топлива, то, вероятно, в полученных результатах сравнительные общие количества горючих материалов в городах недооцениваются. Кроме того, более сельская природа населения в развивающихся странах также склоняет такую оценку C в сторону меньших значений.

Другой возможной мерой для оценки *fuel loading*, указанной в таблице 12, является *human appropriation of net primary productivity (HANPP)* [Imhoff, 2004]. Параметр *HANPP* означает среднее за год количество на душу населения потребляемой пищи, а также используемых изделий из дерева, волокна и бумаги. Это включает, главным образом, изделия из целлюлозы, т.е. материала, доминирующего в топливной массе в развитом мире (таблицы 8 и 9). Как отмечено в [Imhoff, 2004], соотношение по параметру *HANPP* между индустриальными странами и развивающимися государствами составляет около 0,56. Эта величина сравнима с другими измерениями коэффициента C.

Рассматривая обсуждавшиеся выше данные таблиц 10-12, мы пришли к выводу, что коэффициент C – т.е. отношение среднего значения *fuel loading* на душу населения для городских жителей в развивающихся странах к такому же показателю в развитом мире – может в настоящее время лежать в пределах около 0,5. Мы также отмечаем, что более вероятные оценки топливной нагрузки требуют применения значений C больше, чем 0,5.

Вторичной проблемой относительно значений С является вопрос о том, произошли ли с 1980 года (базовый год в наших исследованиях) по настоящее время значительные изменения в распределении fuel loading, указанном в таблицах 8 и 9, или в удельной массе топлива на душу населения  $M_f$ . Между 1980м и 2000-м годами население развитого мира увеличилось примерно на 12%. В то же самое время, эмиссия двуокиси углерода в развитых странах значительно не выросла (Таблица 11). Стабильная эмиссия этого вещества предполагает, что остались на относительно том же уровне и запасы ископаемых видов топлива на душу населения. Для сравнения, объем спиленных деревьев, использованных на душу населения, в развитом мире снизился в 2000 году до 78% от объема 1980 года [FAOSTAT, 2005]. Это снижение, однако, было скомпенсировано большим ростом использования клееной фанеры, картона и других подобных продуктов, необходимых в строительстве. Соответственно, общее потребление таких материалов на душу населения уменьшилось менее, чем на 10%. Для Соединенных Штатов, использование изделий из дерева на душу населения оставалось примерно одинаковым с 1960 по 1995 годы [Matos, 1998]. Turco [1986] предсказывал, что использование пластика в развитом мире должно было удвоиться к 2000 году. И в самом деле, в США его потребление выросло в два раза между 1980 и 1995 годами [Matos, 1998]. Удвоение потребления пластика ведет в таблице 8 к увеличению коэффициента выброса сажи с 0,016 грамм (сажи)/грамм (топлива) до 0, 018 грамм (сажи)/грамм (топлива), с предположением при этом, что коэффициент С мог бы быть увеличен примерно на 13% с тем, чтобы скорректировать увеличенное потребление пластика в мире.

Вопросом, широко обсуждавшимся в предшествующей работе, являлась степень вымывающего влияния дождя на движущиеся вследствие пожаров конвективные столбы [Pittock и др., 1989; Turco и др., 1990]. Следуя Turco [1990], мы принимаем здесь базовое значение вымывающего параметра *R* (доля не удаленного дыма) равным 0,8. Это относительно высокое значение *R* 

предполагает неэффективное удаление дыма из скоплений пирокучевых облаков, движимых городским пожаром. Наблюдения такой конвекции, связанной с лесными пожарами, показывают, что здесь может иметь место рассеивание частиц дыма над покрывающими кучевыми облаками, которые несколько сдерживают стимулирование выпадения осадков. Как следствие, удаление дыма, по существу, не происходило в султанах пирокучевых облаков, которые стабилизируются ниже на высоте около 5 км [Andreae и др., 2004]. В соответствии с [Andreae и др., 2001], в случае природных пожаров отношение количества частиц аэрозолей дыма размером более 0,1 микрона к повышенным концентрациям одноокиси углерода (enhanced carbon monoxide concentrations) находится вблизи пожара в пределах 5-20 см<sup>3</sup>/ppb. Jost и др. [2004] нашли, что это соотношение равнялось 7 в султанах дыма глубоко в стратосфере над Флоридой, которые появились в результате пожаров в Канаде, имевших место несколькими днями ранее; при этом было сделано заключение, что частицы дыма не были существенно истощены в течение выброса в стратосферу (или при их последующем перемещении на тысячи километров в стратосфере). Такое свидетельство соизмеримо с выбором R = 0.8. Наоборот, дым, выброшенный на малых высотах и перемещаемый по ветру в регионы с активной конвекцией и природными осадками, может быть значительно разжижен, что способствует его более эффективному удалению. Например, по некоторым наблюдениям на высотах около 10 км, в дымовых султанах, перенесенных далеко от создавших их пожаров глубокими тропическими конвективными системами, имелся дым с соотношением по параметру CO до уровня примерно в 1 см<sup>3</sup>/ppb [Andreae и др., 2001; при этом предполагалось, что старые аккумулированные аэрозоли дыма были экстенсивно вымыты дождями. Быстрое удаление дыма при городских пожарах, по предположениям и наблюдениям, гораздо менее эффективно. Более того, как предполагается в последних исследованиях султанов больших пожаров, нагревание солнечными лучами и стабилизация больших облаков дыма наверху препятствуют затем долговременному процессу вымывания [Robock и др., 2006].

#### 6.2. Высоты столбов дыма

Дым может удаляться дождями, которые быстро уменьшаются с высотой и практически прекращаются выше тропосферы. Из этого следует, что высота выброса и стабилизации дыма играет важную роль при определении общего времени существования создаваемого дымового материала. Имеются два механизма для объяснения эффекта подъема дыма. Первый есть подъем за счет пироконвекции, образующейся над большими зонами горения. База важных экстеоретических данных развивается периментальных И на основе пироконвекции, видимой при лесных пожарах, а также расчетов конвекции для интенсивных источников тепла. Второй механизм подъема заключается в нагревании поднимающихся султанов дыма солнцем. Здесь, некоторые данные наблюдений также указывают на эффект такого подъема в природе. Что касается темы настоящей работы, то Robock и другие [2006] в их многочисленных моделированиях больших султанов дыма обсуждают признаки сильного самоподъема (self-lofting), и предоставляют информацию, которая показывает роль высоты пиро-кучевой инъекции на степени последующего выдувания.

Следующий за ядерным взрывом огненный шар поднимается на максимальную высоту в течение нескольких минут. Для 15-килотонных зарядов, рассматриваемых здесь, высота его подъема составляет около 6 км, как указывалось paнee [Glasstone и Dolan, 1977]. Однако полного развития пожары, создаваемые взрывами, достигают в течение нескольких часов. Значит, высота выброса дыма обусловлена энергией, высвобождающейся при горении топлива, а не при ядерном взрыве. Энергия пожара, вызванного ядерным взрывом, намного больше, чем та энергия, которая выделяется в процессе самого взрыва. Около 39% энергии ядерного взрыва преобразуется в тепло, которое способствует подъему огненного шара. Следовательно, при 15-килотонном взрыве высвобождается около 2,4х10<sup>13</sup> Ј тепловой энергии. В Хиросиме, 15-килотонным взрывом было воспламенено примерно 13 км<sup>2</sup> топлива [Isikawa и Swain, 1981]. Предполагая *fuel loading* равным 16 грамм/см<sup>2</sup> и удельное содержание энергии, как у высушенного дерева (15х10<sup>13</sup> Ј/грамм), получаем, что энергия, высвободившаяся при пожарах в Хиросиме, должна была быть около 13х10<sup>16</sup> Ј. Это более чем в тысячу раз превосходит энергию атомного взрыва. При пожарах отмечается не только выделение намного большей энергии, чем при взрыве, но также и тот факт, что эта энергия высвобождается в течение нескольких часов, нагнетая эффективную конвекцию.

Ядерный взрыв в Хиросиме произошел в 8.15 утра по местному времени. Согласно [Isikawa и Swain, 1981], через 30 минут пожары полыхали повсюду. Неистовый массовый пожар (иногда называемый огненной бурей – *firestorm*) с сильными ветрами бушевал с 11.00 утра до 03.00 после полудня. Ветра успокоились к 5.00 вечера. Следовательно, имевшиеся массы топлива были воспламенены за отрезок времени длительностью между 4 и 9 часами. Полагая, что все топливо было зажжено за 4 часа, высвободившаяся мощность должна была быть равной около 2х10<sup>6</sup> MW. Тогда удельная энергия на единицу площади получилась равной 1,7х10<sup>5</sup> W/м<sup>2</sup>, что примерно в 130 раз выше солнечной константы. Похожие интенсивности высвобождения энергии получались при оценках последствий массового пожара в Гамбурге, а также при моделировании пожаров в больших городах, подвергнувшихся ядерным ударам [Pittock и др., 1989].

Лесные пожары могут высвобождать ту же самую энергию, что и указанные массовые городские пожары. Westphal и др. [1991] исследовали очень большой пожар в Канаде, который, как они оценили, создал около 0,45 Тg дыма. Этот пожар, очевидно, сжег в течение 24 часов 95% биомассы с плотностью 1,5 грамм/см<sup>2</sup> на площади 720 км<sup>2</sup>. Значит, усредненный за 24 часа выход энергии составлял примерно 1,9х10<sup>6</sup> MW, что сравнимо с рассмотренными выше данными по Хиросиме, хотя площадь пожара в Канаде была в 50 раз больше.

Большой интерес представляло изучение подъема султанов дыма от горящих нефтяных скважин в Кувейте, подожженных иракскими войсками в 1991 году. Small [1991] подсчитал, что при горении нефтяной скважины расход энергии составляет около 300 MW. Т.к. скважины были удалены друг от друга на расстояния примерно в 1 км, они представляли собой очень маленький источник энергии по сравнению с лесными пожарами, или же с массовыми пожарами, такими, как в Хиросиме. Значит, следовало ожидать, что султаны дыма от горящих скважин будут ограничены контурами (нефтяного – В.Я.) пласта; и, действительно, наблюдения, сделанные в ходе войны в Заливе, подтвердили, что эти султаны дыма находились внутри границ этого пласта.

Имеется множество результатов наблюдений подъема султанов дыма от больших пожаров. Например, столб дыма при пожаре в Канаде, рассмотренном Westphal и Toon [1991], имел высоту 5 км. Похожий пожар, тоже в Канаде, был изучен Colarco и др. [2004], и они вывели, что исходный султан дыма проник на высоту более 6 км. Исследования Fromm и Servranckx [2003] показали, что интенсивные лесные пожары, вместе с глубокой конвекцией, могут перемещать дым далеко в стратосферу. Lavoue и др. [2000], основываясь на данных о лесных пожарах, установили линейное соотношение между интенсивностью фронтального пожара и высотой выброса дыма. Для интенсивных *crowning* (идущих по верхушкам деревьев – В.Я.) пожаров в Канаде они предположили, что дым обычно достигает тропосферы, со средним значением высоты выброса дыма около 7,7 км. Имеются также результаты некоторых наблюдений за высотой султанов дыма при массовых пожарах в городах. В Гамбурге высота конвективного облака оценивается величиной около 9 км [Ebert, 1963].

В то время, как вышеприведенная информация предполагает, что султаны дыма над интенсивными пожарами могут подниматься на большую высоту, в ней не указывается, нужны ли для этого специфические метеоусловия. Trentmann и др. [2006] и Luderer и др. [2006] многократно анализировали подъем дыма при пожаре в провинции Альберта (Alberta), Канада возле города Chisholm в 2001 году, когда дым проник прямо в нижнюю стратосферу. Протяженность этого пожара была оценена в 25 км, при ширине фронта около 0.5 км. Потипичный лесной пожар, а не массовые пожары ЭТО при СКОЛЬКУ предполагаемых ядерных атаках на города, скорость распространения огня составляла около 1,5 м/сек. Trentmann и др. [2006] и Luderer и др. [2006] показывают, что пиро-конвекция в районе Chisholm определялась нестабильностью в атмосфере и зависела от особых метеорологических обстоятельств. Однако проведенное ими моделирование предполагает, что подъем султана дыма не чувствителен ни к количеству влаги в топливе, ни к наличию в дыме большого числа аэрозолей.

На рисунке 10 объединены данные о подъеме дыма, представленные в [Lavoue и др., 2000], и результаты расчетов из Trentmann и др. [2006] и Luderer и др. [2006], сделанных для различных интенсивностей высвобождения энергии. В расчетах Trentmann и др. [2006] и Luderer и др. [2006] предполагается, что линейное соотношение между высотой подъема дыма и интенсивностью линии пожара, отмеченное в [Lavoue и др., 2000], разрушается вблизи тропопаузы. При лесных пожарах перенос дыма глубоко в стратосферу конвекцией, инициированной и поддерживаемой тепловыделением в результате горения, мало эффективен, хотя дым от лесных пожаров наблюдался в нижней и средней стратосфере [Jost и др., 2004; Fromm и Servranckx, 2003; Fromm и др., 2000]

Некоторые исследования с численным моделированием проведены для того, чтобы оценить высоту подъема дыма от массового пожара в городе (Рис. 11). Penner и др. [1986] имитировали пожары с несколькими вариантами их физического размера и степени высвобождения энергии. Они сравнили результаты, полученные в своих моделях, с данными расчетов пожара в Гамбурге, в которых, согласно доступному ограниченному числу наблюдений, предполагаемый пик высоты султана дыма над пожаром составлял 12 км, а высота движущего его ветра – 8 км (Рис. 11). Small и Heikes [1988] изучали вызванные ядерными взрывами массовые пожары в радиусе свыше 5 км. Принятые ими степени падения атмосферных давления и температуры были стабильными на всем протяжении тропосферы. Смоделированные султаны дыма от более интенсивных пожаров имели верхушку далеко в стратосфере, хотя их основания находились на уровне около 4 км. Small и Heikes обнаружили, что для этих больших пожаров высота султана дыма была нечувствительна к площади пожара, а являлась, главным образом, функцией от степени выделения энергии на единицу площади. Penner и др. [1986] тоже провели моделирование таких больших пожаров, предположив стабильные уровни изменений в атмосфере, и получили такие же результаты, что и Small и Heikes (см. Рис. 11). В противоположность этому, Heikes и др. [1990] показали, что для пожаров с радиусом менее 500 метров их размеры оказывают существенное влияние на высоту подъема дыма. Penner и др. [1986] получили примерно такие же расчетные значения высот подъема султанов дыма для пожаров радиусом 500 м, как и Heikes и др. [1990] (Puc. 11).

Максимальные высоты подъема дыма от массовых городских пожаров, полученные в исследованиях Penner и др. [1986], Small и Heikes [1988] и Heikes и др. [1990], сравнимы с результатами моделирования пожара в Chisholm, проведенного Luderer и др. [2006] (Puc. 11). Для Chisholm пожара, мы преобразовали линейную интенсивность в эквивалентную площадную интенсивность путем деления на ширину полосы пожара, принятую за 500 метров. Как и в Heikes и др. [1990], при таком сравнении предполагается, что радиус пожара играет важную роль в высоте подъема дыма. При тех пожарах, чьи диаметры превышали высоты атмосферного масштаба (около 10 км), дым, вследствие пироконвекции, проникал в тропосферу и нижнюю стратосферу. С другой стороны, пиро-конвекция, создаваемая пожарами с размером, меньшим высот атмосферного масштаба, - такими, как линейные пожары в лесу и массовый пожар в Гамбурге, - поднимала дым преимущественно в среднюю и верхнюю тропосферу.

Как было показано Trentmann и др. [2006] и Luderer и др. [2006], большие лесные пожары могут с помощью пиро-конвекции вбрасывать дым в нижнюю стратосферу. Однако, Jost и др. [2004] и Fromm и др. [2000] наблюдали дым глубоко в стратосфере. Результаты исследований с применением мезо-масштабных (*mesoscale*) моделей предполагают, что дым от лесных пожаров, который был поднят пиро-конвекцией, способен и далее двигаться вверх за счет его нагревания солнцем [G. Stenchikov, private communication, 2006; E.J. Jensen, private communication, 2006]. Robock и др. [2006], в сопутствующей работе, показывают, что при моделированиях на глобальном уровне такой подъем дыма происходит также в случае регионального ядерного конфликта.

Мы заключаем, что при массовых пожарах в городских регионах, вызванных 15-килотонными взрывами, дым, скорее всего, может подниматься в верхнюю тропосферу, хотя невероятно, чтобы исходные султаны дыма проникали в тропосферу до тех пор, пока радиус пожара не превысит несколько километров. Будущие численные моделирования массовых городских пожаров с радиусом в несколько километров были бы полезны, чтобы лучше понять поведение пироконвекции при пожарах такого размера, а также зависимость подъема дыма от окружающих метеоусловий. Следует отметить, что рисунки 10 и 11 относятся к пиковым значениям султанов дыма. Как показано Penner и др. [1986] и Small и Heikes [1988], а также другими исследователями, дым выбрасывается на широком диапазоне высот. Даже при пожарах с вершиной султана дыма далеко в стратосфере, значительная его доля остается в тропосфере. Однако, после окончания выброса дыма в тропосферу, возможен дальнейший подъем за счет нагревания масс самого дыма солнцем. Консервативно оценивая высоту исходного выброса дыма для рассматриваемых здесь сценариев и для оценки климатических последствий [Robock и др., 2006], мы принимаем за базовый вариант, что дым однородно выбрасывается в слой с давлением от 150 до 300 миллибар, хотя мы также рассматривали инжекцию дыма и в более высокие, и в более низкие слои атмосферы.

#### 6.3. Расчеты выброса дыма в региональном конфликте

Мы используем LandScan (2003) базу данных о плотности населения как информацию о fuel loading, суммируя произведения P и  $M_f$  над зоной пожара. Fuel loadings, обобщенные в таблице 13, представляют усредненные значения над пожарами в 50-ти зонах ударов в различных странах, как пример типичных fuel loadings. Для 15-килотонного взрыва мы полагаем, что площадь зоны пожара равна той, что была в огненной буре Хиросимы - 13 км<sup>2</sup> - созданной оружием такой же мощности. Fuel loadings в таблице 13 сравнимы с теми, что получены для центров американских городов, и старых европейских городов времен второй мировой войны, как обсуждалось выше и обобщено на рисунке 9.

Используя равенство (4), мы подсчитали выброс элементарного углерода в каждой из зон удара для ряда различных стран. На рисунке 12 показано, что в разных странах величина выброса дыма отличается, и внутри страны она также неодинакова в разных зонах ударов. Эти отличия имеют место из-за отклонений в плотности населения, а, значит, и величин *fuel loading*. Анализ, обобщенный в таблице 13, предполагает, что атака на отдельно взятую страну 50-тью 15-килотонными зарядами может создать черный углистый дым объемом от несколько менее 1Tg до более, чем 5Tg, с учетом быстрого вымывания дождем. Большая часть этой «сажи» располагалась бы в средней и верхней тропосфере, или выше, где она может затем продолжать подниматься [Pittock и др., 1989; Robock и др., 2006]. Возможно, что *fuel loading* в развивающихся странах меньше, чем в развитом мире; в разделе 6.1 был приведен коэффициент 0,33-0,5, но он при получении таблицы 13 не использовался.

В соответствии с нашим анализом, 50 ударов 15-килотонными зарядами по городским центрам США создали бы около 1,2 Tg углерода (или химически чистого угля – elemental carbon, В.Я.). Small [1989] предсказывал, что в полномасштабной ядерной войне может быть выброшено в целом 37 Tg дыма, если общая мощность взрывов составляла 3000 Мт, и они были произведены над 4300 целями (около 1700 из них - военные цели вне городских регионов), с охватом при этом примерно 50% американских городских и пригородных зон. Интенсивность создания дыма в нашем сценарии сопоставима почти линейно с количеством взрывов в городских зонах. Однако, количество дыма на килотонну выходной мощности при взрывах маломощных зарядов в 100 раз больше, чем в случае применения высоко-мощного оружия, т.к. уровень *fuel loading* в центре города гораздо выше, чем в среднем для всего городского и пригородного топливного комплекса в целом. В сценариях с большим числом высоко-мощных ударов, многие взрывы либо перекрывают друг друга, либо происходят в малонаселенных районах с очень низким уровнем *fuel loading*.

В приведенных оценках выбросов дыма есть много неопределенностей. Мы предположили, что все топливо в атакованном регионе горит (Q = 1), и что очень немного удаляется за счет конвекции (R = 0.8); оба эти предположения определяют верхние границы. В то время, как среднее количество топлива на одного человека,  $M_f$ , которое мы использовали, отличается на 10% в различных исследованиях, мы предположили, что люди, живущие в компактных городских районах, имеют то же значение этого усредненного параметра, что и те, кто обитает в менее населенных местах. Выбирая, например, 50 наиболее густонаселенных регионов в США, мы установили среднюю топливную нагрузку на уровне 12 грамм/см<sup>2</sup>, тогда как Larson и Small [1982] считали, что в центрах крупных американских городов она может составлять 63 грамм/см<sup>2</sup>. Ясно, что необходима дополнительная работа, чтобы получить более точные оценки количества горючих материалов в современных мегаполисах, особенно в развивающемся мире. Исследования интенсивных лесных пожаров показывают, что дым от пожаров, вызванных взрывами маломощных зарядов, будет выбрасываться, по большей части, в верхнюю тропосферу. Однако, было бы полезно провести численные моделирования пожаров таких размеров, какие рассматриваются здесь, а также дополнительно изучить природные пожары. *Fuel loading* и выбросы дыма не являются, вероятно, доминирующими источниками неопределенностей при оценке последствий для окружающей среды по сравнению с такими рассмотренными в данном исследовании неопределенностями, как мощности и количества боезарядов, применяемых в возможном «маленьком» ядерном конфликте.

#### 7. Влияния на химию атмосферы

Сгорание от 63 до 313 Тg топлива будет вести к выбросу 1-5 Тg сажи, около 13 Tg окиси углерода *CO* (что равно примерно 2% от ее общего количества на Земле) и около 0,25 Tg окиси азота *NO* (несколько десятков процентов от ежегодного источника  $NO_X$  в стратосфере); при этих расчетах использовались значения выброса дыма, приведенные в Pittock и др. [1989]. Будут создаваться большие количества пиротоксинов, особенно *CO*, и возле пожаров они будут опасными [Postol и др., 1986]. Однако, серьезное влияние глобального или регионального масштаба, связанное с этими газообразными выбросами, представляется маловероятным.

При использовании большого числа высоко-мощных зарядов можно предварительно предсказывать потерю озона в стратосфере, прежде всего, что касается NO, создаваемого поднимающимся огненным шаром. В настоящем случае создание NO не является достаточно интенсивным, чтобы вызвать значительное истощение озонового слоя. Но, выбросы дыма в стратосферу, как представляется здесь, могут вести к существенным расстройствам этого слоя. Во-первых, тепловое излучение от сажи, попавшей в верхнюю атмосферу, заставляло бы бедный озоном воздух подниматься в стратосферу, с вытеснением оттуда воздуха, богатого озоном [Као и др., 1990; Robock и др., 2006]. Кроме того, сажа, достигая стратосферы, вызывала бы ее сильный локальный нагрев, который в свою очередь менял бы интенсивность химической реакции и затем нарушал динамику стратосферы. В предшествующих моделированиях дымовых ядерных облаков большой величины [Као и др., 1990] такие интерактивные эффекты, в течение 20 дней после взрывов, уменьшали общее количество озона в некоторых местах северного полушария на 50%, тогда как в южном полушарии в отдельных регионах отмечалось повышение содержания озона на примерно такое же количество.

Сажа, подобно другим частицам в стратосфере, может также катализировать химические реакции с вовлечением в них таких ключевых разновидностей вещества, как *HCl*, что ускоряет процесс потери озона. С другой стороны, углистый аэрозоль может поглощаться при реакции с озоном [Stephens и др., 1989] и другими окислителями (*oxidants*), а также подвергаться ультрафиолетовому облучению, уменьшающему время существования сажи на высотах стратосферы. Чтобы оценить значение этих процессов, нужно было бы провести полное моделирование химии стратосферы, вместе с дополнительными лабораторными исследованиями. Следует заметить, что для ряда важных реакций недостает постоянных показателей (*constants*) их интенсивности. Тем не менее, существенное истощение озонового слоя в стратосфере есть вероятный исход сценариев, изучаемых в данном исследовании.

## 8. Выводы

Во все возрастающей степени, люди скапливаются в крупных мировых городских центрах, создавая мегаполисы с населением, превышающим 10 миллионов человек. В то же самое время, при сегодняшних продвинутых технологиях можно разрабатывать ядерные взрывные устройства такого небольшого размера, который позволяет легко доставить их на автомашине, маленьком самолете или лодке к самому центру города. Мы показываем здесь, что единственный взрыв мощностью 15 килотонн может привести к гибели, в некоторых случаях, до одного миллиона человек, и ранению значительного количества людей, превышающего тоже миллион. В арсеналах США и России все еще находятся тысячи небольших зарядов, и есть, по крайней мере, еще шесть стран со значительзапасами ядерного оружия. Всего, тридцать три государства ными контролируют (каждое – В.Я.) такие количества высокообогащенного урана или плутония, которых достаточно для производства ядерных устройств. Конфликт между любыми из этих стран с применением 50-100 зарядов мощностью по 15 килотонн способен повлечь гибель числа людей, схожего с потерями во второй мировой войне. Сверх того, даже единственный поверхностный ядерный взрыв, или же воздушный взрыв в дождливых метеоусловиях, произведенный в городском центре, способен, вероятно, привести к тому, что вся территория метрополии будет покинута населением, по крайней мере, на десятилетия из-за разрушения инфраструктуры и радиоактивного заражения. Как следует из уроков урагана «Катрина» в Луизиане, даже локализованная ядерная катастрофа имела бы, скорее всего, жестокие экономические последствия как для данной страны, так и для всего мира. Поражающие воздействия имеют место даже при относительно малых ядерных ударах, т.к. взрывы небольшой мощности наиболее эффективны в центрах городов, где деловая и социальная активность так же высока, как и плотность населения. Наиболее вероятно, что страны-изгои (*roque nations*) и террористы могли бы нанести удар именно здесь. Соответственно, атака против Соединенных Штатов, организованная маленьким ядерным государством или террористами, поддерживаемыми такой страной, могла бы привести к потерям, соизмеримым с теми, что предполагались ранее для случая полномасштабного «контрсилового» ядерного обмена в конфликте между сверхдержавами. Удивительно, но расчетные количества дыма, создаваемого при атаке с общей мощностью ядерных взрывов около одной мегатонны, могли бы привести к серьезным нарушениям глобального климата [Robock и др., 2006].

В представленном здесь анализе имеется много неопределенностей. Некоторые из них могут быть уменьшены относительно легко. Например, обследования *fuel loadings* в развивающихся странах снизили бы неопределенность относительно количеств дыма, создаваемых при городских пожарах. Численное моделирование массовых городских пожаров позволило бы прояснить многое в части высот султанов дыма. Исследования процесса удаления дыма в пирокучевых облаках дали бы более высокую определенность в отношении размеров его выброса. Однако, главные неопределенности состоят, вероятно, в нашем выборе сценариев. Мы выбрали, как цели ударов, зоны с предельными уровнями потерь и создаваемого дыма. Тем не менее, мы взяли при этом очень небольшое число маломощных зарядов в пределах тех их количеств, которые контролируются наименьшими на сегодня ядерными государствами. Возможно использование и гораздо больших арсеналов. Можно предложить много сценариев, часть из которых будет вести к меньшим потерям, меньшей радиоактивности и меньшему выбросу дыма. Тривиальный пример состоит в том, что никакого эффекта не будет, если ядерное оружие не применялось. В других сценариях потери, радиоактивность и дымовые выбросы будут выше. В нашем примере задействовано лишь менее 0,1% от мощности всего ядерного арсенала, существующего на планете. Сегодняшнее наращивание ядерного оружия в растущем числе стран указывает на то, что в следующие несколько десятилетий возможны более экстремальные сценарии, чем тот, что рассмотрен нами. Каждая из этих потенциальных опасностей заслуживает внимательного анализа правительствами всего мира с помощью широких кругов научного сообщества, а также широкого обсуждения.

**Признательность.** A.Robock, G.L.Stenchikov и L.Oman были поддержаны в рамках гранта National Science Foundation ATM-0313592 и 0351280.

## Источники

- Albright, D., Berkhout, F., and Walker, W.: Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996: World Inventories, Capabilities, and Policies, 502 pp., Oxford Univ. Press, New York, (updated http://www.isis-online.org), 1997.
- Aleksandrov, V. V. and Stenchikov, G. L.: On the modeling of the climatic consequences of the nuclear war, Proc. Applied Math., 21 pp., Computing Centre, USSR Academy of Sciences, Moscow, 1983.
- Andreae, M. O., Artaxo, P., Fisher, H., Freitas, S. R., Gregoire, J. M., Hansel, A., Hoor, P.Kormann, R., Krejci, R., Lange, L., Lelieveld, J., Lindinger, W., Longo, K., Peters, W., de Reus, M., Scheeren, B., Silva Dias, M. A. F., Strom, J., van Velthoven, P. F. J., and Williams, J.: Transport of biomass burning smoke to the upper troposphere by deep convection in the equatorial region, Geophys. Res. Lett., 28, 951–954, 2001.
- Andreae, M. O., Rosenfeld, D., Artaxo, P., Costa, A. A., Frank, G. P., Longo, K. M., and Silva-Dias, M. A. F.: Smoking rain clouds over the Amazon, Science, 303, 1337– 1342, 2004.
- Bouville, A., Simon, S. L., Miller, C. W., Beck, H. L., Anspaugh, L. R., and Bennett, B.G., Estimates of doses from global fallout, Health Physics, 82, 690–705, 2002.
- Bush, B. W., Dore, M. A., Anno, G. H., and Small, R. D.: Nuclear Winter Source-Term Studies Volume VI-Smoke produced by a nuclear attack on the United States, DNA-TR-86-220-V6, Defense Nuclear Agency, Alexandria, VA, 1991.
- Clodfelter, M.: Warfare and Armed Conflicts a Statistical Reference, Vol II 1900– 1991, 1414 pp., McFarland and Co., Jefferson, NC, 1992.
- Colarco, P. R., Schoberl, M. R., Doddridge, B. G., Marufu, L. T., Torres, O., and Welton, E. J.: Transport of smoke from Canadian forest fires to the surface near Washington, D.C.: Injection height, entrainment and optical properties, J. Geophys. Res., 109, D06203,

doi:10.1029/2003JD004248, 2004.

- Crutzen, P. J. and Birks, J. W.: The atmosphere after a nuclear war: Twilight at noon, Ambio 11, 114–125, 1982.
- Daugherty, W., Levi, B., and Von Hippel, F.: Casualties due to the blast, heat, and radioactive fallout from various hypothetical nuclear attacks on the United States, in: The Medical Implications of Nuclear War, edited by: Solomon, F. and Marston, R. Q., National Academy of Sciences, Washington, DC, 1986.

- Decker, E. H., Elliott, S., Smith, F. A., Blake, D. R., and Rowland, F. S., Energy and material flow through the urban ecosystem, Ann. Rev. Energy Environ., 25, 685–740, 2000.
- Ebert, C. H. V.: The meteorological factor in the Hamburg fire storm, Weatherwise, 16, 70–75, 1963.
- Ellis, J.: World War II A statistical survey, 315 pp., Facts on file, New York, 1993.
- FAOSTAT: faostat.fao.org forestry data, updated Feb. 2005, 2005.
- Fromm, M. D., Alfred, J., Hoppel, K., Hornstein, J., Bevilacqua, R., Shettle, E., Servranckx, R., Li, Z., and Stocks, B.: Observations of boreal forest fire smoke in the stratosphere by POAM III, SAGE II, and lidar in 1988, Geohpys. Res., Lett., 27, 1407–1410, 2000.
- Fromm, M. D. and Servranckx, R.: Transport of forest fire smoke above the tropopause by supercell convection, Geophys. Res. Lett., 30, 1542, doi:10.1029/2002GL016820, 2003.
- Gibson, J. N.: Nuclear Weapons of the United States, 236 pp., Schiffer Pub. Ltd., Atglen, PA, 1996.
- Glasstone, S. and Dolan, P. J.: The Effects of Nuclear Weapons, 3rd ed., 653 pp., United States Department of Defense, and Energy Research and Development Administration, Washing-ton, D.C., 1977.
- Harwell, M. A.:, Nuclear Winter: The Human and Environmental Consequences of Nuclear War, 179 pp., Springer-Verlag, New York, 1984.
- Harwell, M. A. and Hutchinson, T. C.: Environmental Consequences of Nuclear War Vol II Ecological and Agricultural Effects, SCOPE-28, 2nd ed., 523 pp., Wiley, Chichester, England, 1989.
- Heikes, K. E., Ransohoff, L. M., and Small, R. D.: Numerical simulation of small area fires, Atmos. Environ. 24A(2), 297–307, 1990.
- Imhoff, M. L., Bounoua, L., Ricketts, T., Loucks, C., Harriss, R., and Lawrence W. T.: Global patterns in human consumption of net primary production, Nature, 429, 870–873, 2004.
- Ishikawa, E. and Swain, D. L. (Translators): Hiroshima and Nagasaki the Physical, Medical, and Social Effects of the Atomic Bombings, 702 pp., Basic Books, New York, 1981.
- Jost, H. J., Drdla, K., Stohl, A., Pfister, L., Loewenstein, M., Lopez, J. P., Hudson, P. K., Murphy, D. M., Cziczo, D. J., Fromm, M., Bui, T. P., Dean-Day, J., Gerbig, C., Mahoney, M. J., Richard, E. C., Spichtinger, N., Pittman, J. V., Weinstock, E. M., Wilson, J. C., and Xueref, I.: Initu observations of mid-latitude forest fire plumes deep in the stratosphere, Geophys. Res. Lett., 31, L11101, doi:10.1020/2003GL019253, 2004.
- Kao, C. J., Glatzmaier, G. A., and Malone, R. C.: Global three-dimensional simulations of ozone depletion under postwar conditions, J. Geophys. Res., 95, 22 495– 22 512, 1990.
- LandScanTM Global Population Database: Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, available at: http://www.ornl.gov/landscan/, 2003.
- Larson, D. A. and Small, R. D.: Analysis of the Large Scale Urban Fire Environment, Part II. Parametric Analysis and Model City Simulations, Pacific-Sierra Res. Corp, Contract EMW-C-0747, Work Unit 2564E, 1982.
- Lavou´e, D., Liousse, C., Cachier, H., Stocks, B. J., and Goldammer, J. G.: Modeling of carbonaceous particles emitted by boreal and temperate wildfires at northern latitudes, J. Geophys. Res., 105, 26 871–26 890, 2000.

- Lucas, K. A., Orient, J. M., Robinson, A., Maccabe, H., Morris, P., Looney, G., and Klinghoffer, M.: Efficacy of bomb shelters: with lessons from the Hamburg firestorm, Southern Medical J., 83, 812–820, 1990.
- Luderer, G., Trentmann, J., Winterrath, T., Textor, C., Herzog, M., Graf, H. F., and Andreae, M. O.; Modeling of biomass smoke injection into the lower stratosphere by a large forest fire (Part II): Sensitivity studies, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 6, 6081–6124, 2006.
- Marland, G., Boden, T. A., and Andres, R. J.: Trends: A Compendium of Data on Global Change, Carbon Dioxide Information
- Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, D.O.E., Oak Ridge, Tenn. (http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/em cont.htm), 2005.
- Matos, G. and Wagner, L.: Consumption of materials in the United States 1900–1995, Ann. Rev. Energy Environ., 23, 107–122, 1998.
- McKinzie, M., Mian, Z., Nayyar, A. H., and Ramana, M. V.: The risks and consequences of nuclear war in South Asia, in Out of the Nuclear Shadow, edited by S. Kothari, and Z. Mian, pp 185–196, Zed Books Ltd., London, 2001.
- Middleton, H.: Epidemiology: The future is sickness and death. Ambio 11, 100–105, 1982.
- National Academy of Sciences: Monitoring Nuclear Weapons and Nuclear-Explosive Materials, 250 pp., National Academy of Sciences, Washington, D.C., 2005.
- Norris, R. S. and Arkin W. M.: Known nuclear tests worldwide, 1945-98, Bull. Atomic Scientists, 54(6), 65–67, 1998.
- Norris, R. S. and Kristensen, H. M.: Global nuclear stockpiles, 1945–2002, Bull. Atomic Scientists, 58(6), 103–104, 2002.
- Norris, R. S. and Kristensen, H. M.: Chinese nuclear forces, 2003, Bull. Atomic Scientists, 59(6), 77–80, 2003.
- Norris, R. S. and Kristensen, H. M.: Russian nuclear forces, 2005, Bull. Atomic Scientists, 61(2), 70–72, 2005a.
- Norris, R. S. and Kristensen, H. M.: North Korea's Nuclear Program, 2005, Bull. Atomic Scientists, 61(3), 64–67, 2005b.
- Norris, R. S. and Kristensen, H. M.: French nuclear forces, 2005, Bull. Atomic Scientists, 61(4), 73-75, 2005c.
- Norris, R. S. and Kristensen, H. M.: India's nuclear forces, 2005, Bull. Atomic Scientists, 61(5), 73–75, 2005d.
- Norris, R. S. and Kristensen, H. M.: British nuclear forces, 2005, Bull. Atomic Scientists, 61(6), 77–79, 2005e.
- Norris, R. S. and Kristensen, H.M.: U.S. nuclear forces, 2005, Bull. Atomic Scientists, 61(1), 73–75, 2005f.
- Nuclear Energy Agency: Chernobyl: Assessment of Radiological and Health Impacts, 2002 Update of Chernobyl 10 years On, 155 pp., Nuclear Energy Agency OECD Publications, Paris, France, 2002.
- Oughterson, A. W. and Warren S.: Medical Effects of the Atomic Bomb in Japan, 477 pp., McGraw-Hill, New York, 1956.
- OTA: The Effects of Nuclear War, Office of Technology Assessment, Washington, DC., 1979.
- Peczkis, J.: Initial uncertainties in "Nuclear winter": A proposed test based on the Dresden firestorm, Clim. Change, 12, 199–208, 1988.
- Penner, J. E., Hassleman Jr., L. C., and Edwards, L. L., Smoke-plume distributions above large-scale fires: Implications for simulations of "nuclear winter", J. Clim. Appl. Meteorol., 25, 1434–1444, 1986.

- Pittock, A. B., Ackerman, T. P., Crutzen, P. J., MacCraken, M. C., Shapiro, C. S., and Turco, R. P.: Environmental Consequences of Nuclear War SCOPE-28, Vol. 1, Physical and Atmospheric Effects, Wiley, Chichester, England, 1989.
- Postol, T. A.: Possible fatalities from superfires following nuclear attacks in or near urban areas, in: The Medical Implications of Nuclear War, edited by: Solomon, F. and Marston, R. Q., pp.15–72, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1986.
- Robock, A., Oman, L., Stenchikov, G. L., Toon, O. B., Bardeen, C., and Turco, R. P.: Climate consequences of regional nuclear conflicts, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 6, 11 817–11 843, 2006.
- Schubert, J.: Examination of the Building Density and Fuel loadings in the Districts Eimsbuttel and Hammerbrook in the City of Hamburg as of July 1943, E. Molton (translator), SRI Report NRDL-TRC-68-65, OCD Work Unit No. 2536D, 1969.
- Shapiro, C. S., Harvey, T. F., and Peterson K. R.: Radioactive fallout, in The Medical Implications of Nuclear War, edited by F. Solomon and R. Q. Marston, 167–203, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1986.
- Simonett, D. S., Barrett, T. N., Gopal, S., Holsmuller, F. J., and Veregin, H.: Estimates of the magnitude and spatial distribution of combustible materials in urban areas: a case study of the San Jose Area, California, Fire and Materials, 12, 95–108, 1998.
- Small, R. D.: Atmospheric smoke loading from a nuclear attack on the United States, Ambio 18, 377–383, 1989.
- Small, R. D.: Environmental impact of fires in Kuwait, Nature, 350, 11–12, 1991.
- Small, R. D. and Heikes, K. E.: Early cloud formation and large area fires, J. Appl. Meteorol., 27, 654–663, 1988.
- Stephens, S. L., Calvert, J. G., and Birks, J. W.: Ozone as a sink for atmospheric carbon aerosols today and following an nuclear war, Aerosol Sci. Technol., 10, 326–331, 1989.
- Trentmann, J., Luderer, G., Winterrath, T., Fromm, M., Servranckx, R., Textor, C., Herzog, M., and Andreae, M. O.: Modeling of biomass smoke injection into the lower stratosphere by a large forest fire (Part I); Reference study, Atmos. Chem.. Phys. Discuss., 6, 6041–6080, 2006.
- Turco, R. P.: Recent assessments of the environmental consequences of nuclear war, in: The Medical Implications of Nuclear War, edited by: Solomon, F. and Marston, R. Q., 96–116, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1986.
- Turco, R. P., Toon, O. B., Ackerman, T. P., Pollack, J. B., and Sagan, C.: Nuclear winter: Global consequences of multiple nuclear explosions, Science, 222, 1283–1292, 1983.
- Turco, R. P., Toon, O. B., Ackerman, T. P., Pollack, J. B., and Sagan, C.: Climate and smoke: An appraisal of Nuclear Winter, Science, 247, 166–176, 1990.
- United Nations Secretariat: World Population Prospects: The 2002 Revision and World Urbanization Prospects: The 2003 Revision, Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, (http://esa.un.org/unup), 2006.
- Wallace, T. C.: The May 1998 India and Pakistan nuclear tests, Seismological Res. Lett., 69, 386–392, 1998.
- Westphal, D. L. and Toon, O. B.: Simulations of microphysical, radiative, and dynamical processes in a continental-scale forest fire smoke plume, J. Geophys. Res., 96, 22 379–22 400, 1991.

## Таблицы

Страна	Год анализа	Всего зарядов	Взорвано <sup>д</sup>	Атмосферных испытаний <sup>g</sup>
Индия	2003	85(65–110) <sup>a</sup>	2-5	
Пакистан	2003	52(44–62) <sup>a</sup>	2-6	
Израиль	2003	116(102–130) <sup>a</sup>		
Китай	2003	<b>400</b> <sup>b</sup>	45	23
Франция	2005	350 °	210	50
Англия	2005	< 200 <sup>d</sup>	45	21
США	2005	5315 <sup>e</sup>	1030	215
Россия	2005	7200 <sup>f</sup>	715	219

#### Таблица 1. Наличие ядерного оружия

<sup>а</sup> Чтобы подсчитать количество ядерного оружия у Индии, Пакистана и Израиля на 2003 год, были использованы оценки наличия *Pu* и *HEU*, приведенные в Albright и др. [1997]. Мы приняли, что каждый заряд содержал 5 кг *Pu* или 25 кг *HEU*. Пределы доверительных интервалов для количеств *Pu* и *HEU* составляют 5% и 95%.

<sup>b</sup> Norris и Kristensen [2003]. 280 из них относятся к стратегическому оружию.

<sup>с</sup> Norris и Kristensen [2003c].

<sup>d</sup> Norris и Kristensen [2003e].

<sup>е</sup> Norris и Kristensen [2003f]. 4535 из этих зарядов – стратегические. Имеется также 5000 нетронутых боезарядов в резерве или незадействованных хранилищах.

<sup>f</sup> Norris и Kristensen [2003а]. 3814 из них – стратегические. Другие 9000 нетронутых боезарядов находятся в резерве или незадействованных хранилищах.

<sup>g</sup> Norris и Arkin [1998].

**Таблица 2.** Годы, когда различные страны остановили свои ядерные программы; имеют ли они, или имели ранее, предприятия по обогащению урана или выделению плутония; число ядерных боезарядов, которое может быть создано из Ри или HEU, находящегося в их распоряжении на конец 2003 г. [Albright и др., 1997]. Для большинства стран Ри или HEU имеется в программах с гражданскими ядерными реакторами<sup>а</sup>

		Прелприятия по	Возможное	Возможное
Страна	Год прекращения	обогашению Ц		
Cipana	ядерных программ		число зарядов,	число зарядов,
<i>a</i>		или выделению і и	110 10 KI I U	110 25 KI 1111
ядерные стр Илтой	ланы	UEU Du	010	990
Китаи Франция	деиствуют	HEU, PU HEU Du	910	880
Франция	деиствуют	HEU, PU HEU Du	23010	1320-13/2
Россия	деиствуют	HEU, PU HEU Du	2/120	43520-44120
АНГЛИЯ	деиствуют	HEU, PU HEU Du	9030-10240	22222
	деиствуют	HEU, PU	50250	28200
De Facto яде	рные страны			
ИНДИЯ	деиствуют	HEU, PU	1390-1490	
Израиль	деиствуют	HEU(?), Pu	50	1
Пакистан	деиствуют	HEU, PU	84	44
Сев. Корея	деиствуют	HEU(?), Pu	4	1
Неядерные	страны			
Аргентина	> 1990	HEU, Pu	1100	
Армения			140	
Австралия	< NPT b	HEU(?)		14
Беларусь	Унаследованы 1990-е	_		10-15
Бельгия		Pu	2350-2450	28-30
Бразилия	> 1990	HEU, Pu	210	
Болгария		_	850	
Канада	< NPT b	Pu	13500	54
Чехия			620	3-5
Египет	< NPT b			
Финляндия			1100	
Германия		HEU, Pu	9300-9600	56-108
Венгрия			750	6-10
Иран	действуют	HEU(?)		
Ирак	1990-е			_
Италия			650	4-8
Япония		HEU, Pu		
Казахстан	Унаследованы 1990-е		15160-15360	80
Латвия				1
Ливия	2003			1
Литва			1000	
Мексика			240	
Нидерланды		HEU	300-390	29-32
Польша		P		20
Румыния	> 1970	Pu	240	1
Словакия			840	
Словения			270	
Ю. Африка	> 1970, свое оружие	HEU UFU Du	580	24-30
корея	> 1970	HEU, PU	4400	
испания	> 1970		2090	
швеция	< NP1 D		4180	
швеицария	> 1970	D	1750-2000	
1 аивань Мирания	> 1970	Pu	2200	6.10
у краина Урбонистот	у наследованы 1990-е		4100	0-10
узоекистан	> 10 - 0			4
югославия	> 1970			

<sup>а</sup> Включая облученный и необлученный плутоний. Включая НЕU на всех стадиях обогащения. Включая материалы в собственности страны, но не на ее территории. Мы опускаем <sup>237</sup>Np и Am, которые тоже могут быть использованы в ядерном оружии. <sup>b</sup> < NPT – указывает программы, которые были закрыты в момент или до подписания Договора о нераспространении ядерного оружия (Nuclear Non-Proliferation Treaty).

Таблица 3. Характерные девиации (σ) распределения
числа погибших и раненых, полученные по данным рисунков 2 и 3

Параметр	Ширина нормального распределения
Хиросима, погибшие [Ougherson и Warren, 1956]	1,0
Хиросима, погибшие [Ishikawa и Swain, 1981]	1,15
Хиросима, погибшие + серьезно раненые [Ishikawa и Swain, 1981]	1,46
Хиросима, погибшие + все раненые [Ishikawa и Swain, 1981]	1,87
Хиросима, погибшие + раненые из [Ishikawa и Swain, 1981]	2.05

Таблица 4. Возможные потери от одного 15-Кт взрыва в мегаполисе

Страна	Погибшие	Погибшие	Погибшие	Погибшие	Потери	Эквива-
-	при воз-	при воздушн.	при наземн.	при наземн.	страны в	лентное
	душн.	взрыве. Город	взрыве от уд.	взрыве от	прошлых	кол-во
	взрыве.	со второй	волны и по-	радиации.	конфликтах	наземных
	Город с	наивысш.	жаров.Город	Город с наи-		ядерных
	наивысш.	плотн. насе-	с наивысш.	высш. плотн.		взрывов
	плотн. на-	ления	плотн. насе-	населения		
	селения		ления			
Аргентина	223 000	156 000	111 000	56 000	<b>700</b> <sup>a</sup>	1
Бразилия	385 000	266 000	207 000	32 000	0	1
Китай	760 000	592 000	450 000	74 000	3 320 000 <sup>b</sup>	6
Египет	612 000	601 000	317 000	111000	8500 <sup>a</sup>	1
Франция	269 000	198 000	144 000	28 000	592 000 <sup>b</sup>	3
Индия	571 000	469 000	419 000	62 000	3000 <sup>a</sup>	1
Иран	287 000	274 000	155 000	38 000	450 000 - 730000 <sup>a</sup>	2-3
Израиль	225 000	161 000	132 000	25 000	2800 <sup>a</sup>	1
Япония	223 000	206 000	114 000	31 000	2 133 000 <sup>b</sup>	14
Пакистан	503 000	487 000	249 000	103 000	3-8 000 a	1
Россия	299 000	237 000	152 000	35 000	17 700 000 <sup>b</sup>	> 50
Англия	126 000	111 000	76 000	39 000	453 000 <sup>b</sup>	5
США	206 000	190 000	114 000	44 000	405 000 <sup>b</sup>	3

<sup>а</sup> [Glodfelter, 1992]. В случае с Ираном была рассмотрена война Ирана и Ирака в 1980-1988 годах; для Египта и Израиля – война 1973 г.; Аргентина – конфликт 1982 г. с Англией; Индия и Пакистан – война 1971 г.

<sup>b</sup> [Ellis, 1993]. Потери России оценены по второй мировой войне.

Страна	Один воздушный взрыв. Серьезно ранено/ легко ранено/всего постра- давших. Город с наивыс- шей плотностью насе- ления. (Тыс. чел.)	Один воздушный взрыв. Серьезно ранено/ легко ранено/всего пострадав- ших. Город со второй наивысшей плотностью населения. (Тыс. чел.)	Один наземный взрыв. Серьезно ранено/ легко ранено/всего постра- давших. Город с наи- высшей плотностью населения. (Тыс. чел.)
Аргентина	123/179/526	77/102/335	70/109/290
Бразилия	165/197/746	80/83/430	114/156/477
Китай	265/297/1322	166/165/923	203/258/911
Египет	317/450/1379	264/342/1207	184/283/785
Франция	126/166/561	92/123/418	79/116/339
Индия	249/327/1147	212/273/954	160/230/709
Иран	127/157/571	134/197/606	84/119/358
Израиль	81/91/397	65/74/300	60/78/271
Япония	117/163/503	117/177/500	68/104/287
Пакистан	272/381/1155	261/363/1111	159/242/651
Россия	157/229/685	100/142/479	92/140/384
Англия	41/48/214	62/85/258	33/40/149
США	94/131/430	77/103/370	58/85/257

Таблица 5. Общее число пострадавших от одного 15-Кт ядерного взрыва <sup>а</sup>

<sup>а</sup> Общее число пострадавших включает погибших и всех раненых. Для наземного взрыва пострадавшие от радиации не учитывались.

Страна	Воздушные взрывы. Погибшие от ударной волны и пожаров.	Наземные взрывы. Погибшие от ударной волны и пожаров.	Наземные взрывы. Погибшие от радиации.
Аргентина	4 337 000	2 394 000	810 000
Бразилия	7 962 000	4 370 000	1 834 000
Китай	16 716 000	9 306 000	2 554 000
Египет	7 834 000	4 384 000	1 656 000
Франция	3 509 000	1 879 000	923 000
Индия	12 424 000	6 494 000	2 539 000
Иран	7 431 000	4 231 000	1 371 000
Израиль	2 594 000	1 538 000	323 000
Япония	5 890 000	3 023 000	1 766 000
Пакистан	9 171 000	5 112 000	1 525 000
Россия	6 273 000	3 543 000	1 299 000
Англия	2 891 000	1 565 000	792 000
США	4 056 000	2 203 000	872 000

Страна	50 воздушных взрывов. Число серьезно раненых/ легко ране- ных/общее число пострадавших (тыс. чел.)	50 наземных взрывов. Число серьезно раненых/ легко ране- ных/общее число пострадавших (тыс. чел.)
Аргентина	1846/2233/8415	1242/1736/5371
Бразилия	3522/4445/15929	2283/3267/9920
Китай	6955/8560/32230	4755/6550/20611
Египет	3146/3623/14604	2219/3011/9614
Франция	1570/1907/6986	1037/1472/4388
Индия	6069/7853/26347	3731/5552/15776
Иран	2890/3316/13637	2064/2772/9067
Израиль	868/918/4380	693/863/3094
Япония	2991/3953/12834	1797/2716/7536
Пакистан	3830/4562/17563	2597/3613/11321
Россия	2468/2897/11638	1762/2362/7667
Англия	1287/1621/5799	845/1199/3608
CIIIA	1825/2305/8186	1176/1691/5070

Таблица 7. Суммарное число потерь при 50-ти взрывах 15-Кт зарядов <sup>а</sup>

<sup>а</sup> Общее число потерь включает погибших и всех раненых. Для наземных взрывов потери от радиации не учтены.

Материал	Macca mon- лива, Tg ª	Доля от общей массы данной категории, F	Коэффициент эмиссии чистого углерода, S <sup>ь</sup>	F*R*S*C*Q <sup>c</sup>
Дерево, пиломатериалы	9450 ± 3150	0,83	0,01 (0,002 – 0,02)	0,0066
Первичные и вторичные нефтепродукты	1190 ± 310	0.10	0,06 (0,03 – 0,10)	0,0048
Пластик и полимеры	430 ± 30	0.04	0,08 (0,05 - 0,10)	0,0026
Асфальтовые покрытия	$375 \pm 125$	0,03	0,1 (0,06 - 0,13)	0.0024

Таблица 8. Топливные показатели в развитом мире около 1980 г. [Turco и др., 1990]

<sup>а</sup> Масса топлива в развитом мире около 1980 г., среднее значение ± крайние значения

<sup>b</sup> Типовые значения (в скобках – диапазон)

<sup>с</sup> С, Q предполагаются равными единице, R = 0,8

Материал	Масса то- плива, Тд	Доля от общей массы данной категории, F	Коэффициент выброса дыма, S	$F^*R^*S^*C^*Q^a$
Дерево	592	0,45	0,009	0,0032
Бумага	71	0,05	0,005	0,0002
Пластик/Резина	136	0,10	0.071	0,0057
Углеводороды	278	0,21	0,037	0,0062
Ткани	58	0,04	0,017	0,0005
Пища (сухая)	13	0,01	0,013	0,0001
Асфальт	42	0,03	0,121	0,0029
Городские откры- тые мероприятия	132	0.10	0.012	0,0001

## Таблица 9. Топливные показатели для США около 1980 г. [Small, 1989]

<sup>а</sup> С, Q предполагаются равными единице, R = 0,8.

Таблица 10. Данные по го	одам в части топливной нагрузки	и [Decker и др., 2000]

Город	Население в 1995 г. (млн. чел.)	Кол-во трансп. ср-в на человека	Твердые отходы (кг/день/чел.)	С трансп. ср-в / С тв. отходов <sup>ь</sup>
Развитой мир				
Лондон	7,3	0,370		2,4/
Лос-Анжелес	12,4	0,645	<b>3,2</b> <sup>a</sup>	4,1/1,64
Москва	9,2	0,072	0,5	0,46/0,25
Нью-Йорк	16,3	0,109	<b>1,6</b> <sup>a</sup>	0,7/0,82
Осака	10,6	0,069		0,4/
Токио	26,8	0,164	2,5	1,05/1,3
Среднее за развитой мир		0,238 (0,156) <sup>c</sup>	1,95	
<b>Развивающийся</b>	мир			
Пекин	12,4	0,025		0,16/
Бомбей	15,1	0,039	0,5	0,25/0,25
Каир	9.7	0,097	0,5	0,60/0,25
Калькутта	11,7	0,043		0,28/
Дели	9,9	0,168	1,2	1,1/0,62
Карачи	9,9	0,066		0,4/
Шанхай	15,1	0,010		0,06/
Тегеран	6,8	0,066		0,4
Тяньцзинь	10,7	0,027	1,6	0,17/0,82
Среднее за разви- вающийся мир		0,060	0,95	0,38/0,49

<sup>а</sup> Умножено на два, чтобы отразить несоответствие между населением и отходами.

<sup>b</sup> Значения С основаны на предположении, что в развитом мире на одного человека приходится 0,156 единиц транспортных средств или 1,950 кг отходов в день.

<sup>с</sup> В среднем значении в скобках не учтен Лос-Анжелес.

Страна	Выбросы СО₂ в 2000/1980, метрич. тонн углерода/чел. [Marland и др., 2005]	% урбанизации в 2000/1980 [Секретариат ООН, 2006]	Средняя топливная нагрузка на душу населения С <sup>е</sup>	
Развитой мир				
Центральная Европа <sup>с</sup>	2,03/2,40		1	
Океания <sup>d</sup>	2,74/2,25	74 (71)	1,4	
США	5,52/5,48	77 (75) <sup>a</sup>	2,8	
Западная Европа	2,05/2,17	73 (69) <sup>b</sup>	1	
Развивающийся мир				
Китай	0,74/0,41	36 (20)	0,37	
Египет	0,59/0,28	54 (44)	0.3	
Индия	0,32/0,14	41 (23)	0,16	
Иран	1,50/0,81	64 (50)	0,75	
Пакистан	0,2/0,1	33 (28)	0,1	
Среднее за развивающийся мир			0,33	

**Таблица 11.** Выбросы двуокиси углерода как мера количества горючих материалов на душу населения

<sup>а</sup> Северная Америка; <sup>ь</sup> Европа; <sup>с</sup> Включая бывший СССР; <sup>d</sup> Включая Японию; <sup>е</sup> Предполагается, что выбросы СО<sub>2</sub> в развитом мире равны 2,0 метрич. тонн углерода на человека.

## **Таблица 12.** Human Appropriation of Net Primary Productivity (HANPP) [Imhoff и др., 2004]

Местоположение	НАNPP (метрич. тонн углерода / год)
Африка	2,08
Восточная Азия	1,37
Северная Америка	5,40
Южная Америка	3,11
Южная и Центральная Азия	1,21
Западная Европа	2,86

Страна	Общее количество выброшенной сажи (Tg)	Средняя топливная нагрузка (грамм/см²)
Аргентина	1,41	13
Бразилия	2,22	21
Китай	5,22	50
Египет	2,63	25
Франция	1,05	10
Индия	3,67	35
Иран	2.4	23
Израиль	0,85	8
Япония	1,92	19
Пакистан	2,9	28
Россия	1,89	18
Англия	0,91	9
США	1,2	12

# **Таблица 13.** Оценка числа погибших и выброса сажи при 50-ти взрывах по 15 Кт в городских зонах

#### Рисунки



**Рис. 1.** (Вверху): Число ядерных боезарядов в России (СССР), США и общее за все ядерные страны [Norris и Krustensen, 2002]. (Около 10 000 российских зарядов с промежуточным статусом не показаны). Россия и США имеют более 95% от мировых запасов. Число зарядов начало снижаться с 1986 года после заключения Договора по РСМД и к 2002 году составило около одной трети от пика в 1986 году. Ныне действующие договоры не требуют в будущем снижения количества боезарядов, а только ограничивают их число на стратегических носителях.

(Внизу): Арсеналы Китая, Франции и Англии также оставались стабильными или убывали в последние двадцать лет. Отметим, что масштабы верхнего и нижнего рисунков отличаются в 100 раз.



**Рис. 2.** Кривые числа погибших в Хиросиме [(OW) - Oughertson и Warren, 1956; (IS) - Ishikawa и Swain, 1981] и Нагасаки [Oughertson и Warren, 1956], а также нормальное распределение, соответствующее данным по Хиросиме от [Ishikawa и Swain, 1981] со стандартной девиацией  $\sigma = 1,15$ .



**Рис. 3.** Потери в Хиросиме [Ishikawa и Swain, 1981], а также нормальное распределение, соответствующее данным с  $\sigma = 1,46$  и 1,87. Потери определены либо как число погибших плюс число всех тяжело раненых, либо как число погибших плюс число всех тяжело раненых, либо как число погибших плюс число всех раненых, даже относительно легко.



**Рис. 4.** Цели ударов в японском мегаполисе Токио-Иокогама, взятые для сценария в настоящем анализе. По осям координат приведены широта и долгота. Из 50-ти гипотетических японских целей, 28 расположены в этом городском комплексе. Круги с 2-х километровым радиусом обозначают области вокруг точек прицеливания, где вероятны пожары. Голубые оттенки отражают количества погибших от воздушного взрыва на одну расчетную ячейку. Нет погибших в серых областях, которые помечены оттенками в соответствии с населением на одну расчетную ячейку.



**Рис. 5.** Общее число погибших, предполагаемое в конкретных мегаполисах некоторых стран. Цифры в столбцах означают процент от всех погибших в данной стране по сценарию атаки против нее. Например, в Буэнос-Айресе, Каире, Лондоне, Москве, Нью-Йорке, Париже и Токио число погибших составит от 46 до 59% от общего количества потерь в соответствующей стране.



Рис. 6. Возможное число погибших при воздушных взрывах 15-килотонного заряда над каждой из 50 целей в перечисленных странах.



**Рис.7.** (Вверху): Возможная доза облучения всего тела гамма-лучами вне убежища в течение 48 часов по ветру от 15-килотонного наземного взрыва, полученная с помощью упрощенной модели радиоактивных осадков [Glasstone и Dolan, 1977], см. таблицу 9.93 и рисунок 9.26. В этой модели не учитываются снижения результатов при неровностях поверхности или наличии специальных убежищ. Начало 48-часового периода воздействия облучения предполагается с момента, когда осадки переместились на заданное расстояние, хотя примерно 80-90% всей дозы будет получено в первые 24 часа. При принятой скорости устойчивого ветра в 24 км/час с его минимальным вертикальным сдвигом, исходное время колеблется от 10 минут до двух часов после взрыва.

(Внизу): Расстояния от эпицентра взрыва до границ с заданной дозой облучения, полученные с помощью той же самой модели. (Например, данное в поперечном разрезе расстояние от эпицентра до границ, где 48-часовая доза вне убежища составляет, по крайней мере, 1000 рад, равно примерно 1 километру). Максимальная ширина достигается по направлению ветра от места взрыва на расстоянии, которое определяется скоростью ветра в месте взрыва, но она мало отличается от ширины в месте взрыва. Для каждого комплекта исходных данных показаны соответствующие *power law* функции.



**Рис.8.** (Вверху): Карта оцениваемых доз радиации (рад), полученных людьми вне укрытий в мегаполисе Токио-Иокогама. Оси координат означают широту и долготу. Черные кружки с 2-х километровым радиусом ограничивают зоны разрушений от пожаров вокруг каждой цели.

(*Bнизу*): Места, где наибольшее количество погибших должно иметь место из-за первичного выпадения радиоактивных осадков (*fallout*). (Более темные фиолетовые контуры показывают области с очень высокой степенью погибших на расчетную ячейку, что обсуждается в тексте). Фоновые оттенки отражают население в расчете на одну ячейку, с более темным серым цветом там, где плотность населения наивысшая. Шаги сетки для радиации и для потерь в результате радиационного поражения составляют 1/25 по сравнению с шагами сетки для плотности населения.



**Рис.9.** Здесь обобщена информация о соотношении степени топливной нагрузки *FL (fuel loading)* и плотности населения *P*. Данные основаны на результатах изучения систем использования территории земли в ряде городов: San Jose, Simonett и др. [1998]; Hamburg, OTA [1979]; Hamburg, Ebert [1963]; Hamburg, Pittock и др. [1989]; U.S., Bush и др. [1991]. Сплошная черная линия представляет линейное соотношение *FL*  $\alpha$  *P*, или  $\Delta lnFL = \Delta lnP$ . без фонового (нулевое население) вклада в топливную нагрузку. Пунктирной линией показана экстраполяция линейной регрессии, полученная при использовании данных из Bush и др. [1991]; в этом случае, фоновая *fuel loading*, связанная с городской и сельской растительностью, была учтена, что привело к искривлению, видимом на графике при малых значениях *FL*.



**Рис.10.** Высоты султана дыма от лесных пожаров по отношению к линейной интенсивности пожара. Красной и желтой фигурками, и голубым и красным крестиками показаны результаты для пожаров Kruger, Internation Crown Fire, Bor Forest и Red Lake, изученных Lavoue и др. [2000]. Красные кружки – это расчеты из Luderer и др. [2006]. Сплошной линией показана логарифмическая подгонка указанных данных с помощью формулы, приведенной на рисунке.



**Рис.11.** Высоты султанов дыма от массовых городских пожаров с различным радиусом в сравнении с высотами при лесном пожаре как функция от площадной интенсивности пожара.



Цель

**Рис.12.** Оценка выброса углистого дыма в расчете на одну цель для каждой из 50 целей. Выбросы дыма в разных целях отличаются из-за разной плотности населения.