

# Экологические последствия ядерной войны

Оуэн Б. Тун (Owen B. Toon), Алан Робок (Alan Robock),  
Ричард П. Турко (Richard P. Turco)

**Региональная война с применением 100 ядерных зарядов, по мощности подобных бомбе, сброшенной на Хиросиму, будет представлять угрозу всему миру в результате разрушения озонового слоя и изменения климата. Противостояние сверхдержав, владеющих несколькими тысячами единиц ядерного оружия, будет иметь катастрофические последствия.**

**Брайан Тун (Brian Toon)** является главой департамента атмосферных и океанических исследований и сотрудником лаборатории атмосферной и космической физики Колорадского университета в Боулдере (University of Colorado at Boulder). **Алан Робок (Alan Robock)** является профессором в области атмосферных исследований Рутгерского университета в Нью-Брансвике, штат Нью-Джерси (Rutgers University in New Brunswick, New Jersey). **Ричард Турко (Richard Turco)** является профессором в области атмосферных исследований в Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе (University of California, Los Angeles).

Авторизованный перевод статьи Owen B. Toon, Alan Robock, Richard P. Turco, Environmental Consequences of Nuclear War, Physics Today, Vol. 61, Issue 12, Page 37, 2008 (<http://dx.doi.org/10.1063/1.3047679>). © 2008, American Institute of Physics. Перевод с английского С.В. Бершаков, В.Е. Ярынич.

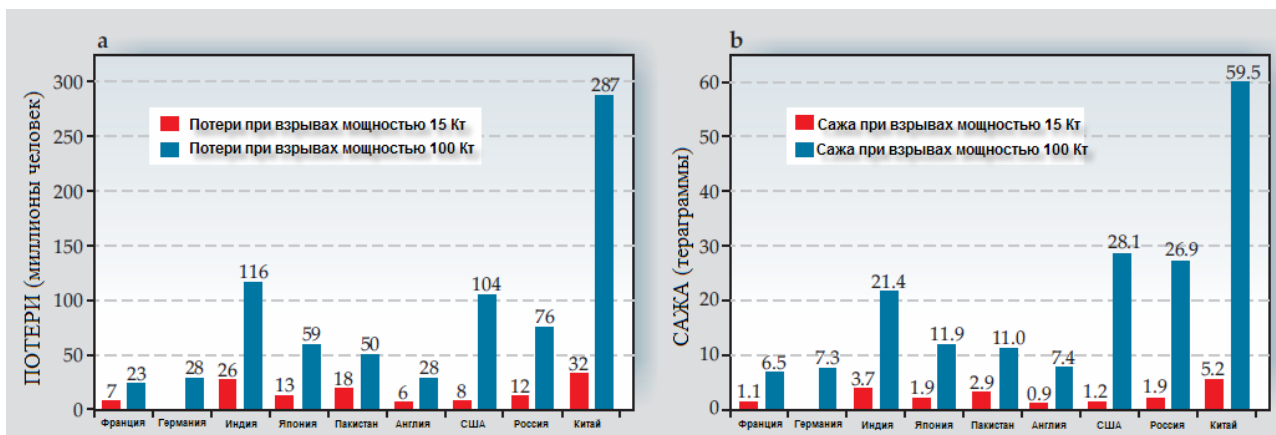
Более 25 лет назад три независимые исследовательские группы внесли ценный вклад в исследования последствий ядерной войны<sup>1</sup>. Пол Крутцен (Paul Crutzen) и Джон Биркс (John Birks) предположили, что в результате глобального обмена ядерными ударами массовые пожары и выбросы дыма в нижние слои атмосферы приведут к серьезным краткосрочным экологическим последствиям. В продолжение их работы, двое из нас (Тун и Турко) совместно с коллегами открыли "ядерную зиму", которая заключается в глобальном похолодании климата в результате стратосферного задымления, что вызовет сельскохозяйственную катастрофу, которая может нести угрозу голодания большинству населения Земли. Владимир Александров (Vladimir Aleksandrov) и Георгий Стенчиков (Georgiy Stenichkov) в СССР впервые использовали модель общей циркуляции атмосферы. Последующие исследования, проведенные во второй половине 80-х годов американской Национальной академией наук<sup>2</sup> (US National Academy of Sciences) и Международным советом научных союзов<sup>3,4</sup> (International Council of Scientific Unions), продолжили эти начинания, чтобы пролить свет на данный феномен. В тот же период президенты Рональд Рейган (Ronald Reagan) и Михаил Горбачев (Mikhail Gorbachev) осознали потенциальную угрозу экологических последствий применения ядерного оружия и подготовили договоры по сокращению того максимума, который был в 1986 году, - сокращение, которое продолжается и сегодня. В 1992 году, когда закончилась холодная война, вероятность ядерных конфликтов сверхдержав существенно уменьшилась. Однако арсеналы ядерного оружия остаются значительными, а его распространение привело к появлению ряда новых ядерных держав. Последние работы наших коллег и нас<sup>5-7</sup> показывают, что даже небольшие арсеналы несут угрозу для людей далеко от места конфликта из-за изменений в окружающей среде, вызванных дымом от пожаров. Между тем, современные модели климата показывают, что прогнозы последствий ядерной зимы были, пожалуй, в 1980-х годах недооценены<sup>8</sup>.

Договор о сокращении стратегических наступательных потенциалов – Договор СНП, (Strategic Offensive Reductions Treaty – SORT) от 2002 года обязывает США и Россию к сокращению численности стратегических ядерных зарядов, развернутых в боеготовом состоянии до 1700-2200 единиц

к декабрю 2012 года. Договор имеет много особенностей: сокращаются боеголовки, а не средства доставки; меры по контролю не уточняются; постоянных сокращений арсенала не требуется; боеголовки не должны быть уничтожены; обе стороны могут быстро «отыграть назад»; договор истекает в тот же день, когда сокращение арсеналов должно быть достигнуто. Тем не менее, в результате сокращений, предусмотренных в СНП, избыточные боеголовки будут уничтожены, и останется только около 6% от имеющихся в 1986 году 70 000 боеголовок. Принимая во внимание такие большие сокращения, на первый взгляд, можно сделать предположение о существенном снижении числа смертных случаев от потенциальной ядерной войны и вероятности серьезных экологических последствий, которые угрожают большей части человечества. К сожалению, это предположение неверно. В действительности же, по нашим оценкам, прямые последствия применения арсеналов в 2012 году приведут к сотням миллионов жертв. А косвенный эффект, вероятно, уничтожит большую часть человеческой популяции.

## Потери и количество дыма

В ядерном конфликте может быть поражена любая из нескольких стратегических целей. Например, в «рациональной» войне лишь немного оружия нацеливается на символически важные цели. И наоборот, «counterforce» война (стратегия противодействия, заключающаяся в нанесении ударов по военнослужащим противника, его силам и средствам) влечет за собой массированные атаки на ключевые военные, экономические и политические цели. Мы рассмотрим «countervalue» стратегию (стратегия, заключающаяся в нанесении ударов по городам и гражданскому населению), в которой целями выступают городские районы, чтобы, главным образом, уничтожить экономическую и социальную инфраструктуру с точки зрения способности к войне и восстановления после конфликта. В любом случае, когда в конфликте задействовано большое количество оружия, различие между «countervalue» и «counterforce» стратегиями уменьшается потому, что военные, экономические и политические цели, как правило, находятся в городских районах.



**Рисунок 1. Потери и сажа. (а)** Потери (погибшие плюс раненые) и **(б)** выброс сажи моделировались для нескольких стран с нанесением по ним 50 ударов мощностью 15 Кт или варьируемого количества 100 Кт ударов, возможных при СНП-сценарии, как показано в тексте. (Результаты для случаев 15 Кт брались из источника 5)

В Приложении 1 описывается, как мы оцениваем потери (погибших и раненых) и выбросы сажи (углерода); на рисунке 1 показаны результаты. Рисунок показывает прогноз погибших и количества сажи, поднятой в верхние слои атмосферы, в результате нанесения ядерных ударов по нескольким странам в регионе с участием 50 блоков мощностью 15 килотонн и суммарной мощностью 0.75 мегатонн. Рисунок также иллюстрирует прогноз людских потерь и количества сажи, вызванных войной с участием арсеналов, оставшихся после выполнения договоренностей по СНП. При таком конфликте (СНП-конфликт) мы полагаем, что Россия нацелит 1000 боезарядов на США и по 200 боеголовок на Францию, Германию, Индию, Японию, Пакистан и Великобританию. Мы предполагаем, что США нацелит по 1100 боеголовок на Китай и Россию. Мы не учитываем 1000 боезарядов, находящихся в Великобритании, Китае, Франции, Израиле, Индии, Пакистане и, возможно, в Северной Корее. (О ядерных арсеналах мира см. Приложение 2) Сценарии войны, проиллюстрированные на рисунке, используют широкий набор возможных вариантов нанесения ударов, включая однако максимальный и минимальный ущерб, которые могли бы произойти.

Как показывает рисунок 1, война между Индией и Пакистаном, в которой каждая из сторон использует боезаряды суммарно в 0.75 мегатонн, привела бы к гибели около 44 миллионов и выбросу около 6.6 триллионов граммов (Tg) сажи. СНП-конфликт с участием 4400 ядерных взрывов суммарной мощностью 440 мегатонн привел бы к 770 миллионам смертей и выбросу 180 Tg сажи. Цифры СНП-сценария являются меньшими пределами, поскольку при моделировании мы использовали оружие мощностью 100 килотонн; в действительности среднее значение общей выходной мощности СНП-сценария будет больше. Результаты могут быть относительно нечувствительны к распределению ударов по различным странам, поскольку удары по малонаселенным районам вызывают меньшее количество сажи. Например, нанесение 100 ударов по Франции и 100 ударов по Бельгии приведет примерно к такому же количеству образованной сажи, что и применение 200 зарядов по одной только Франции. С другой стороны, применение меньшего количества оружия в густонаселенных регионах типа Индии и Китая ведет к сокращению образования сажи.

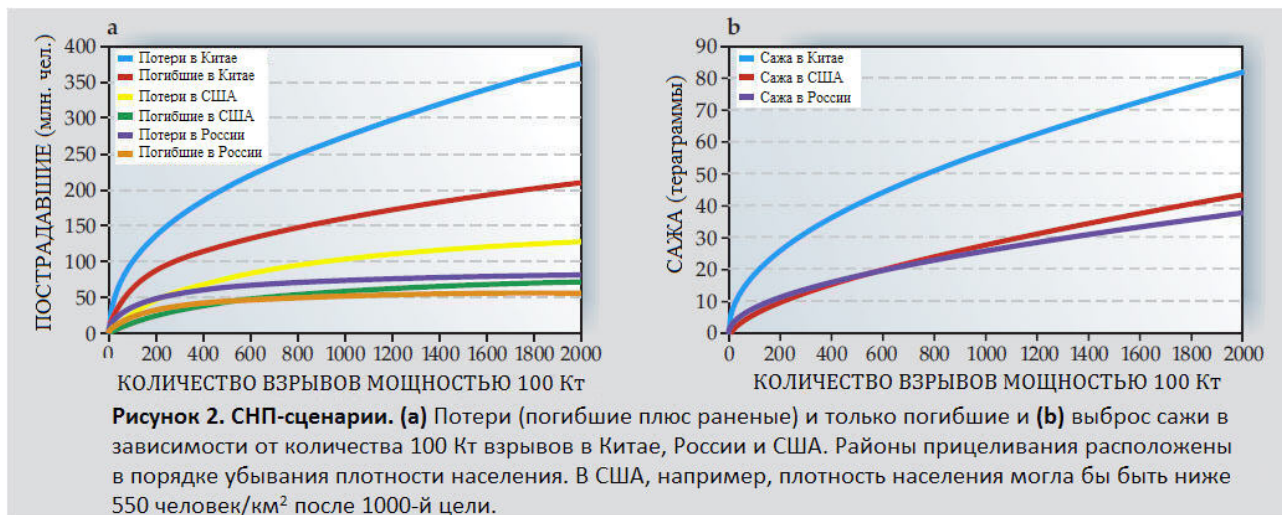
4400 взрывов, которые нами рассмотрены, на 1000 взрывов больше, чем это возможно при снижении до минимальных размеров ядерных арсеналов по Договору СНП. Однако, даже если США и России удастся достичь этого нижнего предела, примененное ядерное оружие приведет к выбросу такого же количества сажи и людским потерям, которые будут подобны только что описанным. Поскольку мир урба-

низирован, СНП-конфликт может непосредственно влиять на большие группы населения. Например, в результате подрыва 1000 боезарядов в США, 48% от общей численности населения и 59% городского населения может погибнуть примерно в 5 км от эпицентра; 20% от общей численности населения и 25% городского населения могут быть убиты сразу, а дополнительные 16% от общей численности населения и 20% городского населения могут оказаться ранеными.

Рисунок 2 иллюстрирует, как количество потерпевших и погибших, а также количество выброшенной сажи повышаются в Китае, России и США вместе с увеличением числа взрывов мощностью 100 Кт. При построении рисунка мы предполагали, что нацеливание по регионам производится в порядке убывания плотности населения в радиусе 5,25 км от эпицентра, как указано в Приложении 1. Бомбардировки Китая имели бы самые тяжелые последствия, поскольку в этой стране есть много густонаселенных городских центров. Действительно, бомбардировка густонаселенных городских кварталов относительно небольшим количеством зарядов влечет за собой большее число пострадавших и сажи. Например, 50% общего количества сажи, выброшенной в результате подрыва 2000 зарядов, было бы результатом 510 взрывов в Китае, 547 взрывов в России, 661 – в США. Одна подводная лодка США, несущая 144 головные части мощностью 100 Кт, могла бы привести к выбросу около 23 Tg сажи и 119 миллионам пострадавших при атаке по городским районам Китая и почти 10 Tg сажи и 42 миллионам пострадавших при атаке на российские города.

В конце 1980-х, Брайан Буш (Brian Bush), Ричард Смол (Richard Small) с коллегами оценили выбросы сажи в ядерном конфликте.<sup>9</sup> Их работа, независимо от исследований, которыми мы оба (Тун (Toon) и Турко (Turco)) занимались, затрагивала контрсиловую атаку России на США. Они предположили, что заряды мощностью по 500 Кт запланированы по 3030 конкретным целям, таким как американские армейские, морские и военно-воздушные базы, склады топлива, заводы и порты, а не ракетные шахты или пункты управления пуском. В этих сценариях нападения города не выступали явными мишенями, но, в конце концов, 50% американских городов были уничтожены.

Буш и его коллеги оценивали 37 Tg выброшенного дыма, который содержит не только поглощающую свет черную копоть, но и непоглощающие органические вещества и другие соединения, которые оказывают меньшее воздействие на климат, чем сажа. Используя нашу методику оценки выбросов во время горения, которая учитывает сажу, выпадающую вместе с дождем, мы приходим к результату, эквивалентному примерно 21 Tg выбросов сажи. Во время моделирования



«countervalue» (противоценностного) нападения с применением 1000 единиц ядерного оружия мощностью 100 Кт, мы обнаружили, что было произведено 28 Тг сажи. Полученная нами область горения несколько больше, и на нее приходится больше выбросов сажи. Короче говоря, в обоих сценариях воздействию подвергаются аналогичные городские территории, и создается примерно то же количество сажи.

Однако Буш и коллеги предполагали в 3 раза большее количество единиц оружия и в 15 раз большую суммарную взрывную мощность, чем использовали мы. Из-за нацеливания по несколько зарядов на некоторые объекты, а также перекрытия зон взрывов, в их сценарии используется встроенный коэффициент избыточности горения величиной около 8.7; наша же модель не принимает избыточность в расчет. По сути, в своем анализе из 3030 конкретных целей в США Буш с коллегами выделили лишь 348 уникальных, с непрерывающимися зонами взрывов. Такой существенный уровень избыточности примененных средств поражения является симптоматичным для иллюстрации огромных излишков оружия, развернутого супердержавами в 80-х годах XX века.

### Воздействие выброса сажи на окружающую среду

Рисунок 3а показывает средние глобальные изменения осадков и температуры как функцию выброса сажи, которые были посчитаны с помощью последней версии главной климатической модели США.<sup>6,8</sup>

Относительно небольшого количества сажи в размере 5 Тг, которое могло бы быть получено в результате обмена ударами между Индией и Пакистаном, было бы достаточно для получения таких низких температур, которые Земля пережила в последние 1000 лет - ниже, чем в период постсредневекового Малого ледникового периода, или в 1816 году, в так называемый Год без лета. При 75 Тг сажи, а это менее половины того, что мы прогнозируем в гипотетическом СНП-конфликте, температура будет такая же, как во время последнего полного Ледникового периода, а глобальные осадки в среднем сократятся более чем на 25%. С помощью расчетов, проведенных в 1980-х годах, уже было предсказано довольно большое охлаждение в результате выброса 150 Тг.<sup>3</sup> Наши новые результаты, однако, показывают, что сажа поднимается на гораздо большую высоту, чем предполагалось ранее - в действительности, значительно выше высот, которые исследовали модели, используемые в 1980-х. В результате, время, необходимое для того, чтобы масса сажи уменьшилась в  $e$  раз, составляет около пяти лет в нашей модели, в отличие от примерно одного года, как предполагалось в 1980-х. Это увеличенное время жизни сажи делает изменение климата более драматичным и более стабильным.

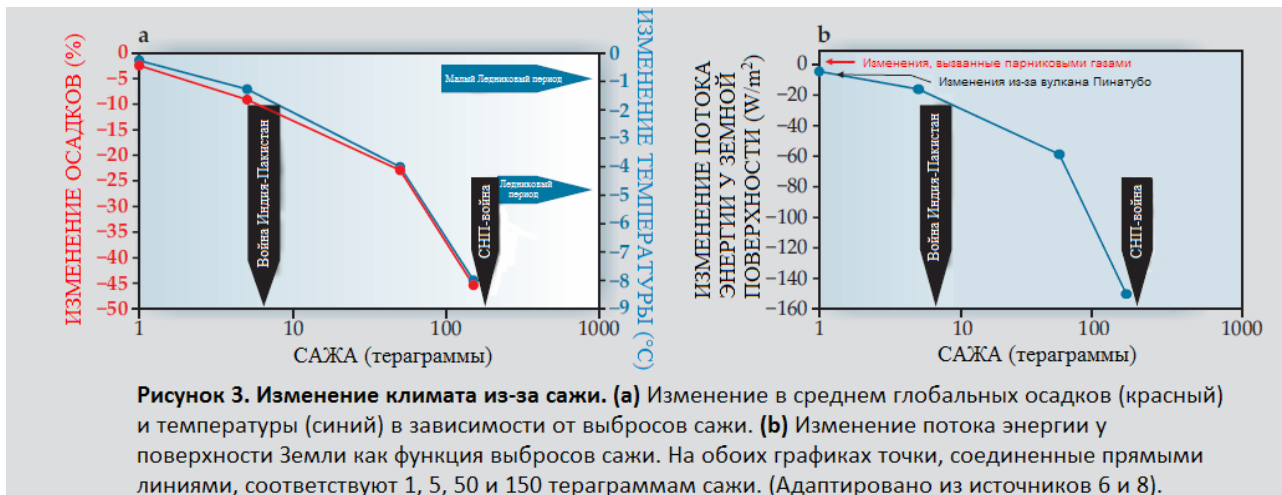
Изменения температуры, представленные на рис. 3а, будут оказывать большое воздействие на сельское хозяйство в средних и высоких широтах. Изменение режима осадков, с другой стороны, будет иметь наибольшее влияние в тропиках.<sup>6</sup> Даже 5 Тг выбросов сажи привело бы к 40% сокращению осадков в Азиатском регионе муссонов. Южная Америка и Африка увидели бы большое уменьшение количества осадков в результате конвекции в восходящих потоках циркуляции Хэдди, являющейся основной глобальной меридиональной ветровой системой, связывающей тропики и субтропики. Изменения в динамике циркуляции Хэдди могут вообще повлиять на климат в глобальном масштабе.

Дополнением к изменению температуры является воздействие радиации, изменение потока энергии. Рисунок 3б показывает, как ядерная сажа изменяет воздействие солнечной радиации на поверхность Земли, и сравнивает эти эффекты с двумя хорошо известными явлениями: с потеплением, связанным с парниковыми газами, и извержением вулкана Пинатубо (Mount Pinatubo) в 1991 году, крупнейшим в XX веке. Со времени промышленной революции парниковые газы привели к увеличению потока энергии на 2,5 Вт/м<sup>2</sup>. В результате извержения вулкана Пинатубо максимальное изменение потока энергии кратковременно достигало около -4 Вт/м<sup>2</sup> (знак минус означает, что поток уменьшился). Одним из выводов по рисунку является факт, что даже региональная война между Индией и Пакистаном может вызвать изменения климата в гораздо большей степени, чем в результате воздействия парниковых газов, которые являются предметом больших опасений по части изменения климата в обозримом будущем.

Конечно, продолжительности воздействий различны: радиационное воздействие ядерного оружия, вызывающего выброс сажи, может сохраняться в течение десятка лет. Что же касается парниковых газов, то, как ожидается, это может продлиться в течение столетия или даже больше, оставляя время для реагирования климатической системы на эти воздействия. Таким образом, несмотря на то, что температуры Ледникового периода (рис. 3) могли бы привести к увеличению морских льдов и континентального снега, этот фактор, вероятно, не будет достаточно стойким для того, чтобы вызвать глобальное нарастание ледниковых покровов.

Сельское хозяйство зависит от продолжительности вегетационного периода, температуры во время вегетационного периода, уровня освещенности, осадков и других факторов. В 1980-е годы были проведены систематические исследования изменений в сельском хозяйстве, ожидаемые в результате ядерной войны, но такие исследования были выполнены без использования современных климатических моделей. Рисунок 4 представляет результаты наших расчетов по снижению продолжительности вегетационного периода, т.е. времени





между температурами замерзания, на второе лето после выброса сажи в результате ядерного конфликта.<sup>6,8</sup> Даже 5 Tg выброшенной сажи сокращает вегетационный период до кратчайших сроков, наблюдавшихся на Среднем Западе США в районах выращивания кукурузы. В результате ранее проведенных исследований последствий полномасштабного ядерного конфликта известно следующее: «Что можно сказать с уверенностью, ... это то, что человеческая популяция на Земле имеет гораздо большую уязвимость по отношению к косвенным последствиям ядерной войны [в том числе ущерб для сельского хозяйства, транспорта, энергетики, медицины, политической и социальной инфраструктуры], особенно опосредованное воздействие на производство продовольствия и доступность продуктов питания, чем прямые последствия самой ядерной войны». И как следствие, «косвенное воздействие может привести к потере от одного до нескольких миллиардов человек.»<sup>4</sup>

Так как сажа, связанная с обменом ядерными ударами, выбрасывается в верхние слои атмосферы, стратосфера нагревается и происходит нарушение стратосферной циркуляции. В результате воздействия 5 Tg сажи, вызванной региональными конфликтами, температура в стратосфере будет оставаться повышенной на 30°C после четырех лет.<sup>6-8</sup> Результирующая температура и циркуляционная аномалия приведут к сокращению столбов озона на 20% по всему миру, 25-45% в средних широтах и 50-70% в высоких северных широтах, в течение 5 лет с существенными потерями, сохраняющимися еще на пять лет.<sup>7</sup> Расчеты 1980-х годов в целом не рассматривают такие последствия или механизмы, которые вызывают их. Скорее, они фокусировались на оценке прямого впрыска оксидов азота из огненного шара в результате применения ядерного оружия большой мощности, которое теперь уже не находится в развернутом состоянии. Глобальные модели лишь недавно стали способны выполнять сложные расчеты химических процессов в атмосфере, необходимые для детального разграничения механизмов, разрушающих озон. Действительно, моделирование потери озона в результате СНП-конфликта до сих пор не проводилось.

### Политические последствия

Научные дискуссии и анализ вопросов, обсуждаемых в данной статье, необходимы не только для получения научных результатов, но также и для создания политического действия. М.С. Горбачев, у которого вместе с Р. Рейганом хватило мужества приступить в 1986 году к сокращению ядерного оружия, сказал в интервью на Мировом форуме государств 2000 года (2000 State of the World Forum): "Модели, созданные русскими и американскими учеными, показали, что ядерная

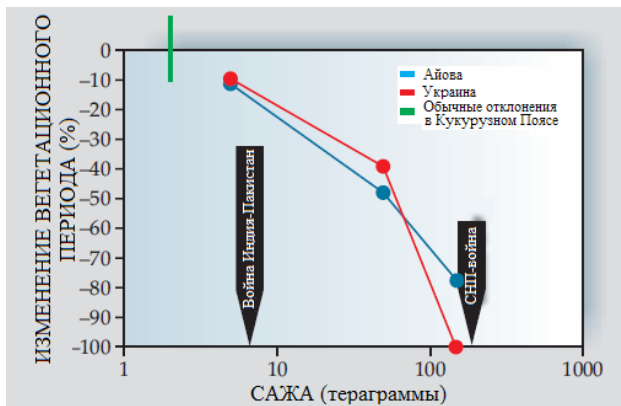
война приведет к ядерной зиме, что имело бы чрезвычайно разрушительные последствия для всего живого на Земле; знание об этом было большим стимулом для нас, людей чести и морали, чтобы действовать в данной ситуации». Бывший вице-президент Альберт Гор отметил в своей речи в 2007 году во время вручения ему Нобелевской премии, что «более двух десятилетий назад ученые подсчитали, что ядерная война может выбросить столько мусора и сажи в воздух, что это заблокировало бы прохождение живительного солнечного света сквозь нашу атмосферу, вызывая "ядерную зиму"». Их красноречивые предупреждения помогли здесь, в Осло, стимулировать решимость мирового сообщества по прекращению гонки ядерных вооружений».

Многие исследователи проводили оценку последствий одного ядерного взрыва, а несколько групп рассматривали результаты небольшого количества взрывов. Но наша работа представляет собой единственное открытое исследование последствий регионального ядерного конфликта, и своей целью она ставила рассмотреть последствия обмена ядерными ударами с применением СНП арсеналов. Ни Департамент национальной безопасности США, ни любое другое правительственное учреждение в мире в настоящее время не располагают несекретными программами по оценке воздействия ядерного конфликта. Ни Национальная академия наук США, ни любые другие научные организации в мире не проводили исследования по этому вопросу в течение последних 20 лет.

Тем не менее, научное сообщество уже давно признало важность проблемы ядерной зимы. Проблема была исследована многочисленными организациями в течение 1980-х годов, и все они нашли научные обоснования ее значимости. Наши последние расчеты также поддерживают концепцию ядерной зимы и показывают, что последствия ядерного конфликта имели бы более длительный и, следовательно, более разрушительный характер, чем думали в 1980-х.

Тем не менее, неправильное представление, что идея ядерной зимы дискредитирована, проникло в сообщество по анализу ядерной политики. Эта ошибка привела ко многим неверным политическим выводам. В частности, одна исследовательская группа недавно заключила, что США могли бы успешно уничтожить Россию в результате внезапного нападения посредством нанесения ядерного удара.<sup>10</sup> Однако, с учетом ядерной зимы, такие меры можно было бы считать самоубийством. Напомним, что нападение США на Россию и Китай с применением 2200 единиц ядерного оружия может вызвать выброс в атмосферу 86.4 Tg сажи, которых вполне достаточно, чтобы создать условия Ледникового периода, влияющие на сельское хозяйство во всем мире, что, возможно, приведет к массовому голоду.

Линн Иден (Lynn Eden) из Центра Международной Безопасности и Сотрудничества (the Center for International



**Рисунок 4. Уменьшенный период вегетации.**

Сокращение продолжительности вегетационного периода в штате Айова и Украине на второе лето после ядерной атаки в зависимости от выбросов сажи. Зеленая полоса показывает естественную изменчивость вегетационного периода для штатов кукурузного пояса Айова, Иллинойс, Индиана и Огайо в 1990-е годы<sup>13</sup>. Точки, соединенные прямыми линиями, соответствуют 1, 5, 50 и 150 тераграммам сажи. (Адаптировано из источников 6 и 8).

Security and Cooperation) в своей книге «Весь Мир в огне»<sup>11</sup> (*Whole World on Fire*) исследует ущерб от ядерной войны с военной точки зрения. Явным результатом ядерного взрыва является взрывная волна. И военные знают, как посчитать воздействие ударной волны, когда они оценивают, в какой мере ядерные силы способны уничтожить цель. Пожары считаются побочным ущербом, который не может быть спланирован, и, следовательно, не учитывается. К сожалению, этот побочный ущерб способен убить большую часть населения Земли.

Так как климатические и химические модели с 1980 годов были существенно усовершенствованы, то значительно выросла возможность расчета изменения состояния окружающей среды после ядерного конфликта. Наша работа в части климата и атмосферной химии использует стандартные глобальные модели «Годдардского института по космическим исследованиям НАСА» (NASA Goddard's Institute for Space Studies) и «Национального центра атмосферных исследований США» (US National Center for Atmospheric Research). Многие ученые использовали эти модели для исследования изменений климата и вулканических извержений, и обе уместны при рассмотрении экологических последствий ядерной войны. В последние два десятилетия исследователи внимательно изучали другие космические тела, состояния атмосферы которых схожи с условиями, возникающими при ядерной зиме, включая исследование термической структуры внешней атмосферы Титана и термической структуры атмосферы Марса во время глобальных пылевых бурь. Также как и вулканы, крупные лесные пожары регулярно создают условия, аналогичные тем, которые возникают в результате выброса сажи в верхние слои атмосферы после ядерной атаки. Хотя много еще предстоит сделать, в течение последних 20 лет ученые получили гораздо большее понимание природных аналогов взрывов ядерного оружия.

Исследованию, представленному в данной статье, присущи существенные неопределенности; многие из них подробно обсуждаются в источниках 5 и 8. Некоторые неопределенности могут быть уменьшены относительно легко. Вот несколько таких примеров: исследование запасов топлива позволило бы сократить неопределенность расхода топлива в городских пожарах. Численное моделирование крупных городских пожаров привело бы к уменьшению неопределенности по поводу высоты дымового шлейфа. Исследование удаления дыма из пиро-кучевых облаков, вызванных пожарами, позволит сократить неопределенность того,

сколько сажи фактически вводится в верхние слои атмосферы. Особенно ценным был бы анализ последствий, связанных с изменением климата вследствие региональных конфликтов, в части их воздействия на сельское хозяйство.

Для любого ядерного конфликта ядерная зима серьезно скажется на не участвующих в боевых действиях странах.<sup>12</sup> В условиях гипотетической СПН-войны, мы предполагаем, например, что большинству населения Земли, в том числе и в Южном полушарии, будут угрожать косвенные эффекты воздействия на глобальный климат. Даже региональная война между Индией и Пакистаном, к примеру, может нанести значительный ущерб Европе, США и другим регионам посредством потери глобального озона и изменения климата. Нынешнее ядерное наращивание во все большем числе стран ведет к тому, что в следующие несколько десятилетий ядерные конфликты могли бы быть более экстремальными, чем война между Индией и Пакистаном сегодня. Увеличение числа стран, имеющих оружие, также делает ядерный конфликт более вероятным.

Экологические угрозы, создаваемые наличием ядерного оружия, требуют серьезного внимания. Правительствам всех стран следует – с помощью значительной части научного сообщества – их тщательно проанализировать и вынести проблему на широкое публичное обсуждение.

Значительная часть наших исследований была основана на расчетах жертв и количества сажи, выполненных Чарльзом Бардином (Charles Bardeen), который смоделировал несколько гипотетических ядерных ударов. Мы благодарим наших коллег Георгия Стенчикова (Georgiy Stenichikov), Люка Омана (Luke Oman), Майкла Миллса (Michael Mills), Дугласа Киннисона (Douglas Kinnison), Роландо Гарсиа (Rolando Garcia) и Эрика Йенсена (Eric Jensen) за вклад в последние научные исследования экологических последствий ядерных конфликтов, на которых основана данная работа. Эта работа поддерживается грантом NSF ATM-0730452.

## Список литературы

1. P. J. Crutzen, J. W. Birks, *Ambio* **11**, 114 (1982); R. P. Turco et al., *Science* **222**, 1283 (1983); V. V. Aleksandrov, G. L. Stenichikov, *On the Modeling of the Climatic Consequences of the Nuclear War: Proceedings on Applied Mathematics*, Computing Center, USSR Academy of Sciences, Moscow (1983).
2. Committee on the Atmospheric Effects of Nuclear Explosions, *The Effects on the Atmosphere of a Major Nuclear Exchange*, National Academy Press, Washington, DC (1985), available online at [http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=540](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=540).
3. A. B. Pittock et al., *Environmental Consequences of Nuclear War: Volume I: Physical and Atmospheric Effects*, 2nd ed., Wiley, New York (1989).
4. M. A. Harwell, T. C. Hutchinson, *Environmental Consequences of Nuclear War: Volume II: Ecological and Agricultural Effects*, 2nd ed., Wiley, New York (1989).
5. O. B. Toon et al., *Atmos. Chem. Phys.* **7**, 1973 (2007).
6. A. Robock et al., *Atmos. Chem. Phys.* **7**, 2003 (2007).
7. M. J. Mills et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **105**, 5307 (2008).
8. A. Robock, L. Oman, G. L. Stenichikov, *J. Geophys. Res.* **112**, D13107 (2007); doi:10.1029/2006JD008235.
9. B. W. Bush et al., *Nuclear Winter Source-Term Studies: Smoke Produced by a Nuclear Attack on the United States*, vol. 6, rep. no. DNA-TR-86-220-V6, Defense Nuclear Agency, Alexandria, VA (1991); R. D. Small, *Ambio* **18**, 377 (1989).
10. K. A. Lieber, D. Press, *Int. Secur.* **30**(4), 7 (2006).
11. L. Eden, *Whole World on Fire: Organizations, Knowledge, and Nuclear Weapons Devastation*, Cornell U. Press, Ithaca, NY (2003).
12. C. Sagan, *Foreign Aff.* **62**, 257 (1983/84).
13. P. Miller, M. Mitchell, J. Lopez, *Phys. Geog.* **26**, 85 (2005).
14. S. Glasstone, P. J. Dolan, *The Effects of Nuclear Weapons*, 3rd ed., US Department of Defense and the Energy Research and Development Administration, Washington, DC (1977), online at <http://www.princeton.edu/~globsec/publications/effects/effects8.pdf>.
15. R. P. Turco et al., *Science* **247**, 166 (1990).
16. T. A. Postol, in *The Medical Implications of Nuclear War*, F. Solomon, R. Q. Marston, eds., National Academy Press, Washington, DC (1986), p. 15.
17. A. Robock et al., *EOS Trans. Am. Geophys. Union* **88**, 228 (2007). ■

## Приложение 1. Методика расчетов

Вероятности числа погибших и пострадавших (т.е. всего погибших и раненых) достаточно хорошо документированы по результатам исследований ядерных атак на японские города Хиросиму и Нагасаки. Кривые вероятностей имеют нормальное распределение от эпицентра взрыва. Это распределение и данные о населении на текущий момент позволяют оценить количество погибших и пострадавших в любом городе. Надо, однако, иметь в виду, что фактическая кривая вероятности для данного города зависит от многих факторов, в том числе от способов строительства и от применяемых материалов. Кроме того, необходимо соизмерять вероятности, учитывая оружие, примененное в Хиросиме и Нагасаки, и оружие, рассматриваемое в нашем анализе.

Количество сажи, выброшенной при горении, также может быть оценено по данным о населении и о количестве горючих материалов на душу населения.<sup>5</sup> Изучение нескольких крупных городов США и центров таких городов, как Гамбург (Германия) после второй мировой войны в соответствии с известным количеством горючих материалов, накопленных в мире, дает основание полагать, что количество горючих материалов на единицу площади в городах развитых стран мира,  $M_f$ , есть линейная функция плотности населения  $P$ :

$$M_f = 1.1 \times 10^4 \text{ kg / person} \times P + 8 \times 10^6 \text{ kg / km}^2$$

Общая масса выброшенной во время пожара сажи при единичном взрыве  $M_s$ , скорректированная на количество, осевшее с дождем, может быть подсчитана как

$$M_s = \sum_{j=1}^J A_j M_{f,j} \sum_{i=1}^N F_i Q_i S_i C_i R_i$$

Первая сумма берется по всем ячейкам сетки в районе возгорания. Мы включаем все ячейки  $J$ , симметрично расположенные вокруг эпицентра взрыва, причем общая площадь пожаров берется пропорционально в сравнении с Хиросимой<sup>14</sup>. Количество  $M_{f,j}$  есть масса горючего материала на единицу площади в ячейке  $j$ , которое зависит от плотности населения в пределах этой ячейки. Площадь ячейки сетки  $j$ , покрытая пожарами, есть  $A_j$ .

Согласно нашему подходу, вторая сумма не изменяется в зависимости от положения вокруг эпицентра взрыва, хотя в реальности это имело бы место. Первый показатель  $F$  есть величина, зависящая от принадлежности горючего материала к одному из  $N$  различных типов – например, дерево, пластик или асфальт, индексированный по индексу  $i$ . Фактор  $Q$  есть доля горючего материала, которая воспламенится после ядерного взрыва.  $S$  – доля горючего материала, который превратится в сажу<sup>15</sup>. Чтобы скорректировать прогнозируемые выбросы сажи с учетом национальных различий в характеристиках горючих материалов, параметр  $C_i$  точно определяет соотношение  $i$ -го вида топлива на душу населения в городе в развитых странах мира. Для учета осевшей сажи в виде "черного дождя", вызванного огненным штормом, средняя доля эмитированной сажи, которая не выдувается в пирогенном конвективном столбе, определяется параметром  $R_i$ . Предполагая, что  $Q_i$  и  $C_i$  являются 1.0 и 0.8, вторая сумма равна 0,016 кг. сажи на кг. горючих материалов. С учетом этого мультипликатора

$$M_s = \sum_{j=1}^J A_j \left[ P_j \left( 1.8 \times 10^2 \text{ kg / person} \right) + 1.3 \times 10^5 \text{ kg / km}^2 \right]$$

Для использования этого уравнения мы применяем систему LandScan, предоставляющую данные по населению, которая разработана министерством энергетики США. LandScan предоставляет средние данные о населении в ячейках сетки с шагом, равным 1 угловой секунде, и площади около 1 кв. км. Для того, чтобы рассчитать количество вы-

брошенной сажи, мы начинаем с площади зоны пожаров в Хиросиме размером 13 кв.км., затем масштабируем ее в соответствии с мощностью применяемого оружия. В частности, поскольку при небольших мощностях взрыва размер зоны теплового потока, вызванного пожарами, изменяется пропорционально мощности оружия, мы используем линейное масштабирование для зон, охваченных пожарами<sup>16</sup>. Мощность бомбы в Хиросиме была 15 Кт. В нашей модели мы использовали оружие 100 Кт, т.к. ядерное оружие такой мощности в большинстве случаев размещено на средствах подводного базирования США, Великобритании и Франции. В этом случае мы считаем зону пожаров равной 86.6 кв.км. на единицу оружия, что соответствует окружности радиусом 5.25 км, центр которой совпадает с эпицентром взрыва. Стандартные отклонения нормальной кривой распределения погибших и пострадавших основаны на данных по Хиросиме, и масштабируются с учетом линейной зависимости от мощности взрыва. Смерть людей в Хиросиме была вызвана проникающей радиацией, ударной волной и пожаром. Однако, количество смертей, вызванных пожарами, будет пропорционально выше для более мощных взрывов, так как смертность от ударной волны и кратковременной проникающей радиации будет уменьшаться с расстоянием быстрее, чем гибель от пожаров.

При изучении нескольких взрывов необходимо рассмотреть, насколько тесно взрывы расположены в пространстве. Для взрывов мощностью 15 Кт мы разносим эпицентры взрывов по крайней мере на 6 км и полагаем, что эффект применения оружия ограничивается непересекающимися кругами с радиусами 3 км. Для относительно небольших взрывов вероятность смерти за пределами 3 км от эпицентра взрыва мала, а вероятность серьезных повреждений составляет менее 5%. Мы предполагаем, что для оружия мощностью 100 Кт расстояние между эпицентрами взрывов будет увеличиваться с 6 до 15.5 км. В такой картине, схожей с нарезкой кружочков домашнего печенья, остаются большие разрывы, где воздействие ядерной атаки отсутствует.

## Приложение 2. Ядерные арсеналы

Ни одно государство официально не объявило о составе своих ядерных арсеналов. Такое молчание представляет собой серьезное препятствие для контроля количества боеголовок и предупреждения распространения ядерного оружия. Тем не менее, различные договоры и другие данные о системах доставки для таких стран, как Китай, Франция, Россия, Великобритания и США, позволили Роберту Норрису (Robert Norris) из Совета по защите природных ресурсов (Natural Resources Defense Council) и Хансу Кристенсену (Hans Kristensen) из Федерации американских ученых (Federation of American Scientists) регулярно докладывать в «Бюллетене ученых-атомщиков» (Bulletin of the Atomic Scientists) о количестве боеголовок. Для Китая данные являются неполными, и последняя информация понизила оценку китайского арсенала в два раза. Арсеналы Индии, Израиля, Северной Кореи, Пакистана и других ядерных держав, которые создавались за рамками Договора 1968 года о нераспространении ядерного оружия, главным образом определяются путем оценки количества расщепляющихся материалов, которые страна могла бы – например, в результате производства плутония в ядерных реакторах – использовать при создании ядерного оружия. Эти оценки, многие из которых выполнены Дэвидом Олбрайтом (David Albright) из Института науки и международной безопасности (Institute for Science and In-

ternational Security), очень трудно подтвердить.

На приведенных ниже графиках, построенных по данным из источника 17, показано изменение запасов ядерного оружия в мире и числа ядерных держав. Израиль и Южная Африка не проводили ядерных испытаний, так что даты, когда они стали ядерными государствами, точно не определены. Южная Африка, Белоруссия, Казахстан и Украина отказались от своих ядерных арсеналов. Хотя общее количество мировых запасов ядерных боеголовок сократилось с 1986 года почти в три раза, примерно 26 000 боеголовок еще существовало на 2006 год и более чем 11 000 боеголовок было развернуто. Значительная часть боеголовок в мире находится на складах, в резерве или в процессе демонтажа. Великобритания и Китай в настоящее время имеют примерно по 200 единиц ядерного оружия, а Франция около 350. Ядерный арсенал Израиля, скорее всего, насчитывает более 100 единиц. Индия и Пакистан, в общей сложности, вероятно, располагают более чем 100 зарядами. Мощности боеголовок трудно определить, но они, скорее всего, находятся в диапазоне от килотонны до десятков килотонн для Индии и Пакистана, и от 100 килотонн до нескольких мегатонн для других ядерных государств.

