

**ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ**

551.56.58 + 541.182.3

**КЛИМАТ И ДЫМ: ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ,  
ПРИВОДЯЩИХ К ЯДЕРНОЙ ЗИМЕ*****Р. П. Турко, О. Б. Тун, Т. Р. Аккерман, Дж. Б. Поллак,  
К. Сэган***

(University of California, Los Angeles; NASA Ames Research Center,  
Mojave Fields (O. B. Toon, J. B. Pollack); Perm State University;  
Cornell University, Ithaca, USA)

Приводится обзор новейших работ, связанных с пониманием проблемы «ядерной зимы». В последние годы достигнут значительный прогресс в количественной оценке образования и инжекции сажи в результате крупномасштабных пожаров, регионального и глобального рассеяния сажи и вызванных этими процессами физических и химических возмущений в окружающей среде. Новая информация получена на основе данных лабораторных исследований, полевых экспериментов и численного моделирования при варьировании масштабов пожаров (пожар локального масштаба, мезомасштаба, глобального масштаба). Для наиболее вероятных инъекции дыма, возникающих при полномасштабном обмене ядерными ударами, трехмерные климатические численные модели приводят к уменьшению средних летних значений температур на 10–20° С; на средних широтах Северного полушария с локальным охлаждением на 35° С и в некоторых районах в летний период — к температурам, характерным для зимы. Обнаружено, что аномальные атмосферные циркуляции, вызванные нагревом сажи солнцем, стабилизируют верхние слои атмосферы относительно вертикального перемешивания и поэтому увеличивают время жизни сажи и ускоряют процессы переноса между полушариями, приводя к продолжительному влиянию их на южное полушарие. Установлены новые, серьезные для окружающей среды проблемы, связанные с инъекцией сажи, включая разрушение муссонов и сильное истощение стратосферного озонового слоя в Северном полушарии. Основные выводы о физике возникновения ядерной зимы подтверждены оценками авторитетных международных технических групп и большим числом индивидуальных научных исследований. В свете последних достижений проводится обсуждение оставшихся областей неопределенности, полученных результатов и приоритетов для дальнейших исследований.

**Введение.** Крутцен и Биркс [1] первыми обнаружили, что дым, образованный при ядерном конфликте, может влиять на прохождение солнечных лучей через атмосферу на большей части Северного полушария и поэтому сильно воздействовать на природные условия. Турко и др. [2] провели первые количественные оценки воздействия дыма и пыли, образованных в результате ядерного конфликта, на климат. Предсказания давали максимальные значения для внутриконтинентального охлаждения земной поверхности в диапазоне 30–35 °С, среднее охлаждение земной поверхности на 10–20 °С и возможное охлаждение земной поверхности летом до температур, характерных для зимы, — так называемый эффект «ядерной зимы». Впоследствии большинство проделанных научных оценок, включая наиболее подробные, выполненные Национальной Акаде-

© R. P. Turco, O. B. Toone, T. R. Acherman,  
J. B. Pollack, C. Sagan 1988

© Перевод на русский язык,  
Академия наук СССР,  
«Успехи физических наук» 1991

мией наук США [3], Международным Советом научных объединений (International Council of Scientific Unions) [4, 5] и Всемирной метеорологической организацией (World Meteorological Organization) [6], было посвящено проблеме ядерной зимы. Опубликованы десятки научных статей и обзоров, посвященных этой проблеме [7]. Более того, в США создана национальная программа для исследования ядерной зимы [8]. Весь этот анализ, включая последнюю работу научного комитета SCOPE [9] и научный доклад ООН [10], привел к выводу о том, что широкомасштабное воздействие ядерной войны на окружающую среду представляет угрозу жизни большей части всего человечества [11]. Хотя значительная неопределенность остается во всех предсказаниях, касающихся последствий ядерного конфликта, в то же время интенсивные исследования, проведенные за последние пять лет, продвинули понимание основных физических явлений, сопровождающих ядерную зиму (относительно неопределенности см. также статьи, указанные в примечании [12]).

Последние научные оценки [6, 9, 10] подтвердили сделанное в ранних работах [1, 2] правильное описание для следующих главных черт основных явлений: значительное количество дыма, возникающего во время ядерных военных действий, приводит к среднему по полушарию ослаблению солнечного излучения на 50% и более; богатый сажей дым от городских пожаров вносит основной вклад в возникновение ядерной зимы; среднее охлаждение земли под покровом дымовых облаков может достигать 10–20 °С; внутриконтинентальные области могут охлаждаться на 20–40 °С и до температур ниже 0 °С, вероятных даже в летний период; верхние слои атмосферы могут нагреваться на 100 °С; нагретый таким образом дым становится устойчивым относительно вертикального перемешивания и вымывания; при нагреве может значительно увеличиться скорость межконтинентального переноса и перемешивания дымовых облаков. В дополнение к этим явлениям, согласно результатам оригинальной работы [2], выводы из которой признаны в общих чертах [4, 9], средние по времени радиактивные осадки будут на порядок величины больше предсказанных более ранними работами. Исходя из вышеизложенного, несмотря на большое число уточнений, следует, что исходная теория ядерной зимы остается в существенной степени неизменной.

В данной работе мы подводим итог значительному числу исследований, проведенных начиная с 1983 г., и приводим новые данные по эмиссионным свойствам дыма и другим оптическим эффектам. Ввиду междисциплинного, международного характера этой работы, обновления старых и быстрого получения новых результатов обобщающий взгляд на проблему нам представляется своевременным. В отдельных разделах мы обсуждаем вид и количество горючих материалов, накопленных по всему миру в городских и сельских зонах, делаем обзор вероятных сценариев поджига топлива при ядерном конфликте. Новые данные приводятся для основных физических параметров. К ним относятся данные по эмиссии дыма и оптическим коэффициентам.

Физика инъекции и удаления дыма обсуждается в свете последних наблюдений и данных теории. Процессы, влияющие на рассеяние дымовых облаков в региональном и глобальном масштабах, определены на основе численного моделирования и атмосферных измерений. На базе этих сведений оценено потенциально возможное ослабление солнечного излучения, вызванное дымом в период вслед за окончанием ядерной войны. В заключение проводится сравнение большого числа прогнозов изменения климата во время ядерной зимы, оценивается состояние науки и направ-

лений будущих исследований. В работе мы касаемся только технических сторон проблемы ядерной зимы, оставляя обсуждение ее политических аспектов для других работ [13].

**Горючие материалы.** Вопросы, связанные с количеством горючих материалов в городских районах, обсуждались в ряде работ [2—4, 14]. Основные данные собраны в табл. I.

К важнейшим типам топлива относятся лесоматериалы и искусственные целлюлозные материалы, горючее на основе нефти и ископаемого угля, пластмассы и соответствующие синтетические материалы, асфальт и сходные вещества, растительность.

Лесоматериалы являются важнейшим строительным материалом. Мы оцениваем, что около 9000 тераграммов ( $1 \text{ Тг} = 10^{12} \text{ г} = 1 \text{ млн. т}$ ) пиломатериалов находится в строениях по всему миру [15]. Это значение находится между нижней (6300 Тг [12]) и верхней (12 600 Тг [4, 13]) оценками. Число 9000 Тг относится только к строительной древесине, количество других целлюлозных материалов (бумаги, картона и тканей) и твердых пиломатериалов, используемых в конструкциях и ограждениях, и проч. [18] оценить гораздо труднее; ими пренебрегается.

Таблица I. Список горючих материалов

Материалы	НАТО/ОВД, Тга	Развитые страны, Тга	Литература
Древесина/лесоматериалы <sup>б</sup>	5 500 11 000 7 800	6 300 <sup>в</sup> 12 600 9 000	[12] [7, 13] [14]
Первичные нефтепродукты	480 530	730 800	[12] [7, 13]
Вторичные нефтепродукты	100 200—400	150 300—700	[12] [7, 13]
Пластмассы/полимеры	343 <sup>г</sup> 400 400 <sup>г</sup>	400 <sup>в</sup> 460 460 <sup>в</sup>	[12] [7, 13] [9]
Асфальтовые покрытия	335 170 <sup>д</sup>	500 <sup>д</sup> 250	[12] [7, 13]
Растительность <sup>е</sup>	150 750	— —	[15] [16]
Общее количество <sup>ж</sup>	6740—13 480 (10 100)	7 980—15 810 (11 900)	

<sup>а</sup>  $1 \text{ Тг} = 1 \text{ тераграмм} = 1 \cdot 10^{12} \text{ г}$ .

<sup>б</sup> Включены стройматериалы из пиломатериалов, не включена фанера и некоторые другие виды лесоматериалов.

<sup>в</sup> Оценено в предположении, что 87% всего количества, находящегося в развитых странах, приходится на страны НАТО и ОВД; см. работу [12].

<sup>г</sup> Пластмассы, производимые в Японии, включены в депозиты стран НАТО и ОВД.

<sup>д</sup> Оценено в предположении, что 66% всего количества находится в странах НАТО и ОВД (см. также [12]).

<sup>е</sup> Растительность, находящаяся вблизи изолированно расположенных целей, таких как стартовые площадки ракет, являющаяся объектом первичного возгорания.

<sup>ж</sup> Общее количество отражает минимальные, максимальные и средние (между максимальными и минимальными) значения представленных чисел. Данные по растительности для развитых стран совпадают с данными для стран НАТО и ОВД. Другие потенциально возможные горючие материалы не включены в суммарное количество (см., например, комментарии к [1—4]).

На рис. 1 показано соотношение мировых нефтеочистительных мощностей и нефтехранилищ. Две трети общего числа очистительных мощностей сконцентрировано всего в 200 местах. Количество сырой нефти и нефтепродуктов первичного хранения достаточно хорошо известно. Данные для США дают величину запаса порядка 180 Тг, включающего около

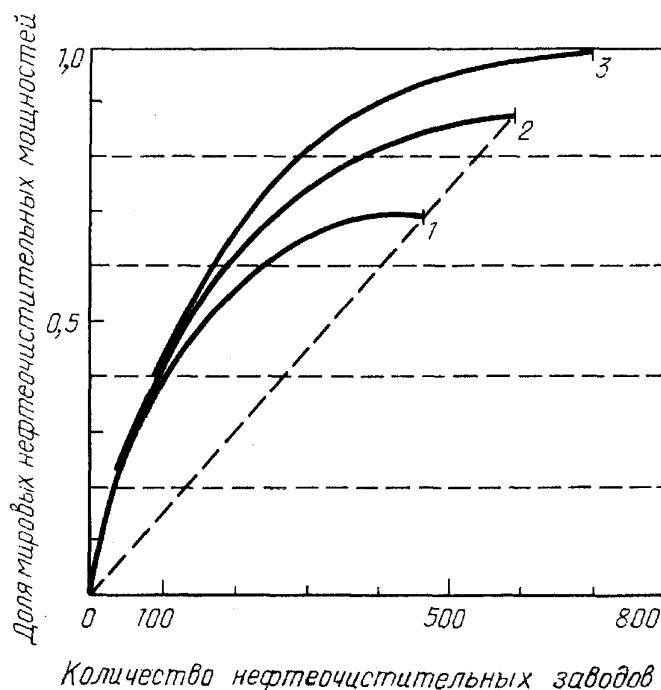


Рис. 1. Зависимость доли мировых нефтеочистительных мощностей от полного числа нефтеочистительных заводов. Данные по нефтеочистительным мощностям приводятся на основе «International Petroleum Encyclopedia». Tulsa, Oklahoma: Penn-Well Publ. Co., 1986). Кривые даны для трех способов группирования стран: 1 — США и союзные страны НАТО, СССР и страны Восточной Европы, входящие в ОВД, Китай; 2 — страны группы 1 плюс страны Среднего Востока, Япония, Австралия и некоторые другие страны, союзнически связанные со сверхдержавами, 3 — все страны со значительными нефтеочистительными мощностями. Для каждой группы индивидуальные очистительные заводы упорядочены с очистительными возможностями, начиная с самых крупных. Неупорядоченное суммирование очистительных мощностей представлено длинными штриховыми линиями (для групп 1 и 2). Запасы нефти коррелируют с нефтеочистительными мощностями (см. выше). Хранилища, расположенные в стороне от очистительных заводов, также сильно сконцентрированы (Office of Technology Assessment.— The Effect of Nuclear War.— Washington, DC, 1979; см. также [27]). Резервуары с жидким топливом сильно уязвимы для детонационного возгорания при ядерном взрыве; тактический взрыв мощностью 10 кт может разрушить резервуары на площади 15 км<sup>2</sup> (Classtone S., Dolan P. J. Effects of Nuclear Weapons.— Dept. of Defence, 1977)

50 Тг в подземном «стратегическом резерве» [16]. Экстраполируя эту величину на развитые страны, можно получить, что общие первичные запасы составляют 730 Тг (см. табл. I). Данные для стран Общего рынка анализировались независимо: из них для первичных мировых запасов следовала величина порядка 800 Тг, включая 100 Тг нефтепродуктов на судах, находящихся как в порту, так и в плавании. Данные о запасах вторичных нефтепродуктов [19] менее определены, результаты оценок находятся в диапазоне от 100 до 700 Тг [4, 16, 17]. Мировое количество асфальта, используемого для покрытий и поэтому наиболее уязвимого для огня, оценивается в 500 Тг (см. табл. I).

В настоящее время от 400 до 500 Тг пластмасс используется в развитых странах (см. табл. I). Ожидается, что это количество удвоится к нача-

лу следующего столетия [20]. Более того, до 3000 Тг пластмасс будет к тому времени произведено и их большая часть будет находиться в местах свалок [20]. Пластмассы при горении выделяют различные токсичные газы, включая хлористый и цианистый водороды, опасные для окружающей среды [2—4].

Очевидно, что многие другие горючие материалы будут подожжены во время крупномасштабного ядерного конфликта; к ним относятся: уголь и природный газ, городская и сельская растительность [21, 22], пищевые запасы, изоляционные материалы на основе мазута, масляные смазочные материалы, краски и отделочные материалы [2, 4, 17]; они непосредственно не учтены в приведенной оценке запаса топлива. Эти материалы могут добавить к полному количеству горючих материалов по самой грубой оценке 10% (за исключением, в частности, запасов горючего из угля, которые по массе могут быть сравнимы с запасами нефти).

По отдельным видам горючих веществ, таких как строительная древесина, последние оценки запасов дают количество в 2—3 раза меньшее, чем было получено раньше [1—3]. Однако величины оценок запасов масел, пластмасс и соответствующих материалов остаются неизменными (см. табл. I).

**Сценарии поджига.** Ядерные арсеналы Соединенных Штатов Америки и Советского Союза в настоящее время насчитывают около 55 000 боеголовок, несущих с собой по грубым оценкам  $10^4$  мегатонн ( $1 \text{ Мт} = 10^{15} \text{ кал} = 4,2 \cdot 10^{15} \text{ Дж}$ ) мощности взрыва [23]. Что существующие арсеналы имеют потенциальные возможности вызвать огромные разрушения при помощи огня, даже без учета других смертоносных последствий, видно хотя бы из того, что при 1-мегатонном взрыве в воздухе может выгореть площадь величиной  $\sim 500 \text{ км}^2$  [3, 4]. Сценарии поджига горючих материалов при ядерных взрывах были обсуждены в нескольких докладах [3, 4, 24]. В настоящее время доступны детальные заключения по наиболее вероятным ядерным атакам по военным и промышленным целям США, включая как полигоны для стратегических ракет, так и сооружения в городах и пригородах [25]. Согласно этим сценариям, приблизительно 50% общей площади городов США ( $\sim 75 \text{ 000 км}^2$ ) будут подвержены действию военных поджигательных средств в дополнение к возможному поджигу больших сельских площадей ( $\sim 500 \text{ 000 км}^2$ ); будет задействовано до 1500 Тг горючих материалов без учета возможного распространения огня. Соответственно при ядерном обмене ударами одновременно с интенсивным поражением ключевых военно-промышленных целей происходит возникновение пожаров, которые уничтожат (в воюющих странах) от 25 до 75% горючих материалов из имеющихся в распоряжении в городах.

В городах, являющихся специальными целями поражения в отличие от побочных целей, рассмотренных выше, совокупная мощность взрыва порядка только 100 Мт ( $\sim 1\%$  мощности арсенала), находящаяся в ядерных боеголовках с мощностью взрыва  $\sim 100 \text{ кт}$ , способна поджечь до половины из имеющихся городских горючих материалов, сконцентрированных в коммерческих промышленных центрах [26]. Нефтезапасы и нефтеочистительные мощности рассматриваются в качестве важнейших стратегических целей [23, 27]. Из-за характера расположения и низкой степени защищенности всего несколько мегатонн, доставленные несколькими сотнями тактических боеголовок, будут способны уничтожить большую часть из важнейших нефтезапасов [28]. Это хорошо видно из рис. 1, на котором приводится сводка данных о мировых нефтеочистительных мощностях.

В оригинальных исследованиях [1—3] упоминались такие специфические цели, как маслоочистительные заводы, однако подробных расчетов проделано не было. Вместо этого были оценены общие площади важнейших городских разрушений. Величины этих площадей приблизительно сравнимы по величине с новейшими данными, обсуждавшимися выше (см. ссылки в [25]).

**Эмиссии дыма.** Дым, получающийся при горении, имеет различные формы. При медленном горении образуется слегка окрашенный дым, состоящий из капелек масел, в состав которых входят нелетучие органические соединения. Горение с пламенем производит черный дым, богатый сажей. Электронная микроскопия показывает, что частицы сажи образуются в виде цепочечных агрегатов, состоящих из очень маленьких твердых шариков [29], с малым отношением Н/С и характерным для графита видом при дифракции в рентгеновских лучах [30]. Сажевые агрегаты могут коагулировать в большие по размерам, содержащие тысячи шариков. Сажевые кластеры имеют открытую морфологию (с фрактальной размерностью  $\sim 2$  [31]), которая устанавливается с ростом агрегатов (если только сажа не подверглась сильному увлажнению — см. [32] и ниже).

При больших пожарах «дым» состоит из набора компонентов, включая капельки масел, сажевые агрегаты, смешанные масляные сажевые частицы, выветренные частицы пыли и осколки, летающие частицы золы и фонового (окружающего) аэрозоля. Однако с точки зрения оптических и климатических последствий сажевая компонента является важнейшей из-за ее высокой эффективности в поглощении света [33]. В соответствии с этим в данном обзоре основное внимание уделено саже [34].

Масса сажи, образованная из единицы массы сгоревшего топлива, определяется как фактор эмиссии сажи. Количество появившейся сажи зависит как от качеств сгоревшего материала, так и от условий горения. Типично, что факторы эмиссии сажи велики для пластмасс и тяжелых нефтепродуктов и малы для дерева и других целлюлозных соединений. Выход сажи имеет тенденцию к росту при увеличении площади пожара и при ухудшении вентиляции (т. е. доступа кислорода) [35]. Большая часть существующей информации по эмиссии сажи из продуктов горения обычных городских топлив была получена в малых и средних по величине лабораторных тестовых пожарах [36 ÷ 39]. Для пластмасс выход сажи может составлять от нескольких до 10% и более [40]. Рассматривая набор пластмасс, использующихся в настоящее время [20], и измерения факторов эмиссии [40], среднее значение фактора эмиссии для пластмасс величиной 5% окажется умеренным, а 10% наиболее вероятны для пожаров зданий. В случае нефтепродуктов и горючего ограниченные данные лабораторных экспериментов [36, 41] и нескольких пожаров открытых резервуаров указывают, что эмиссионные факторы вероятны в диапазоне от 3 до 10% [43].

Древесина и растительность являются наиболее распространенными горючими материалами. Оказывается, что свободно горящая растительность имеет очень низкий фактор эмиссии сажи в диапазоне от 0,1 до 0,3% [39, 44]. Малые, хорошо вентилируемые древесные костры производят до 0,4% сажи [36, 45]. Эти данные согласуются с независимыми измерениями эмиссии сажи из каминов [46]. Однако эксперименты, в которых использовалось большое количество древесной костровой крепи ( $\sim 100$  кг), при частично затрудненной вентиляции приводили к факторам эмиссии вплоть до 3% [37]. Эти результаты применимы при анализе широкомас-

штабных городских пожаров, у которых горение среди стальных и бетонных конструкций, вероятно, проходит в условиях с затрудненным движением воздушного потока. Соответственно средний фактор эмиссии сажи величиной 1 % для древесины выбран с целью воспроизведения условий больших городских пожаров, в то время как величина возможных факторов эмиссии лежит между 0,2 и 3%.

В оригинальном TTAAPS-исследовании [2] средний фактор эмиссии дыма для смешанного горючего в городах был оценен в ~4% (~2% в огненных штормах в центре городов) и ~3% для растительности. По оценкам, от 10 до 20% дыма составляла сажа.

**Быстрое удаление.** Частицы сажи могут быть немедленно захвачены и вымыты из дыма больших пожаров [47] «черным дождем», который вызывают сильная гидродинамическая конвекция и конденсация влаги [2—4, 48]. Скорость выведения сажи зависит от силы дождя, вызванного пожаром, и эффективности, с которой частицы сажи попадают в капли воды и кристаллы льда, которые затем слипаются и выпадают в виде осадков [4]. При наиболее разумных физических предположениях, которые согласуются с доступными в настоящее время научными данными, детальные численные модели физики облаков указывают, что процессы броуновской коагуляции, фориической аккреции и гравитационной коагуляции будут приводить к удалению в лучшем случае нескольких процентов сажи, попадающей в конвективные дымы [49, 50]. Электрическая зарядка частиц может влиять на скорость удаления сажи [51], но пока нет доступных количественных оценок этого эффекта. Предполагается, что свежие частицы сажи гидрофобии (водоотталкивающие) и поэтому малоэффективны в качестве ядер конденсации облаков (ЯКО). Современные лабораторные исследования ЯКО для разных дымов подтвердили это предположение: в то время как ~25 — 75% частиц древесного дыма участвуют в образовании пересыщения в 1% в качестве ЯКО, только около 1% частиц сажи, образующейся при сжигании керосина, активны как ЯКО [53, 54] даже после «старения» в специальных резервуарах в течение 30 мин. Эти фракции ЯКО не становятся значительно большими и после 5-часового старения. Лабораторные результаты для древесного дыма согласуются с большим числом данных, накопленных в серии крупномасштабных полевых пожаров [42, 53]. Измеренные концентрации ЯКО в столбах над горящей растительностью изменялись в диапазоне от  $10^5$  до  $10^6$  см<sup>-3</sup>, что превышало концентрации ЯКО в окружающем воздухе на два-три порядка величины.

Низкая активность сажевых частиц, образованных при сгорании некоторых жидких органических топлив (например, керосина), в качестве ЯКО была подтверждена прямым измерением избыточного количества ЯКО в дыме пожаров больших резервуаров [42, 53]. Хотя в этих экспериментах общее число частиц превышало  $10^4$  см<sup>-3</sup>, концентрация ЯКО оставалась неотличимой от их количества в окружающем воздухе (т. е.  $\leq 10^3$  см<sup>-3</sup>). Аналогичный результат был получен ранее для сажи дыма, образованного при сгорании тяжелого дизельного топлива [55]. Однако имеются некоторые показания относительно того, что сажа, полученная при сжигании неочищенной нефти, может иметь большую активность образования ЯКО [56].

В дыме пожаров различные частицы в дополнение к частицам сажи могут действовать как ЯКО. В их число входят аэрозольные частицы окружающей тропосферы ( $< 10^2$ — $10^3$  см<sup>-3</sup>) [57], выветренные частицы пыли и пепла [58] и частицы масел в дыме ( $10^3$ — $10^5$  см<sup>-3</sup>) [59]. Эти ЯКО будут

конкурировать с сажей в конденсации ограниченного количества паров воды, находящейся в дыме. Известно, что если более чем  $10^3$  капель облака образуется при нуклеизации в  $1 \text{ см}^3$  воздуха, то малые размеры образовавшихся капель препятствуют их слипанию и их выпадения может не происходить [51, 60]. Численное моделирование сильных вертикальных потоков, в которых концентрации ЯКО дыма находятся на уровне  $\sim 10^5 \text{ см}^{-3}$ , показывает на очень низкую эффективность выпадения [61], и общее количество быстро вымытых фракций дыма составляет  $\sim 10\%$  нуклеизованных частиц дыма [49, 50, 62].

Общее количество быстро удаленной сажи (наиболее влияющей на климат компоненты дыма) ограничено несколькими факторами. Первый из них заключается в том, что частицы сажи первоначально относительно малоэффективны как ЯКО [63], и вследствие этого только малая часть ( $\sim 10\%$ ) может быть выведена непосредственно при нуклеизации (и фориических процессах) в зоне конденсации дыма пожара [64]. Выведенная затем в виде осадков часто будет составлять меньше 10% до тех пор, пока другие процессы не начнут вносить значительный вклад. Далее «перезаселение» кучевых облаков высокими концентрациями ЯКО может затормозить выпадение осадков, мешая последующему вымыванию сажи [65]. И, наконец, интенсивное образование конвективных бурь на всем протяжении области, занятой огромными облаками, вызванными ядерными пожарами, как и сильные бури естественного происхождения, проявляет в целом сильно пониженную эффективность в процессах, приводящих к выпадению осадков [4].

Оригинальные оценки работы TTAPS [2] показали, что от 25 до 50% дыма будет мгновенно вымыто из дыма городских пожаров в результате индуцированного выпадения осадков. Однако, основываясь на современных данных, будет более правильным предположить, что в среднем  $\leq 10\text{—}25\%$  эмиссий сажи будет удалено этим способом [62]. Это заключение, согласно которому может быть удалена некоторая часть сажи, согласуется с данными случайных наблюдений «черных дождей» в больших исторических пожарах [2—4, 66].

**Высота инъекций.** Высота инъекции дыма над пожаром зависит от размера пожара, его интенсивности, продолжительности и от местных атмосферных и метеорологических условий.

Результаты численного моделирования динамики пожаров городских размеров предсказывают, что дым будет инжесктирован в среднюю и верхнюю части тропосферы, кроме того, некоторая часть его (вероятно, порядка 10% дыма) будет непосредственно инжесктирована в нижнюю часть стратосферы [49, 67—71]. Даже относительно малые пожары инжесктируют дым в область над приземным атмосферным слоем [44, 72], а большие лесные пожары доставляют дым в район тропопаузы [73, 74]. Нагревание и подъем дыма, происходящие в течение нескольких дней, следующих за инъекцией, обсуждаются ниже.

На рис. 2 представлено несколько профилей инъекции дыма, которые были рекомендованы или были использованы для проведения климатических прогнозов на случай крупных дымовых инъекций, возникающих при ядерной войне. Высоты инъекции дыма варьируются в широких пределах, при этом центр тяжести нижнего профиля инъекции находится на высоте 2,8 км, а верхнего — на высоте 6,5 км. Новейшие исследования инъекции дыма во время городских пожаров с реалистическими данными по сортам горючих веществ и из скорости горения также предсказывают рас-



положение центров тяжести дымовых инъекций в диапазоне 4—6 км [26, 69], которые согласуются с оригинальными оценками TTAPS [2].

**Водные инъекции.** Вода также инжектируется вместе с дымом при больших пожарах. Именно вода ответственна за быстрое вымывание и может постоянно образовывать облака, влияющие на последующее выпадение дождей и возникновение радиоактивных аномалий [1]. Анализ показывает, что в масштабе полушария количество воды, которое может

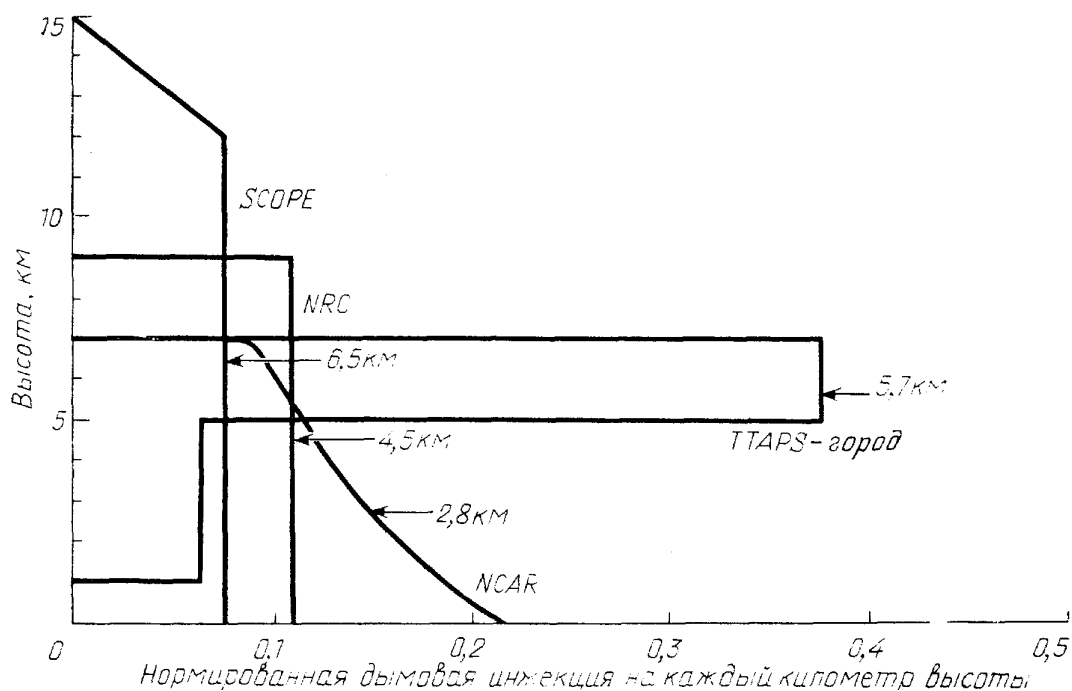


Рис. 2. Профили инъекций дыма для исследований климата и дыма в период ядерной зимы. Профили нормированы на «единичную» дымовую инъекцию, выраженную как масса фракций дыма на километр высоты. Высота, выше и ниже которой выведена половина дыма (т. е. центр масс дыма), указана для каждого профиля. NCAR-профиль относится к инъекций между 0—7 км с постоянным «отношением перемешивания» [75]. Профили TTAPS [2] и NRC [3] обсуждаются в соответствующих работах; они были использованы в прошлом для проведения численного моделирования ядерной зимы. Профиль инъекций SCOPE рекомендован [9] для анализа данных по городским пожарам и для численного моделирования широкомасштабных пожаров [3, 4, 9]

быть инжектировано вместе с дымом, может изменить исходные значения концентрации водяных паров лишь на несколько процентов [3], потому что масса воды, участвующей в этих процессах, относительно мала [76]. Хотя во многих случаях пары воды, избежавшие выпадения в виде осадков, будут первоначально перенасыщенными и поэтому в основном конденсироваться в облака. В свою очередь разрежение и нагрев воздуха, содержащего дым, приведут за несколько дней к прекращению процессов конденсации [77].

Образование приземных туманов под плотными слоями дыма может сдерживать охлаждение поверхности путем выделения скрытой теплоты и поглощения энергии инфракрасного излучения поверхности. Эффекты скрытой теплоты обычно явно учитываются в исследованиях на основе климатических моделей, цитируемых ниже. Эффекты инфракрасного излучения, на которые не всегда обращают внимание, могут оттянуть на некоторое время, но не могут предупредить охлаждение поверхности.

**Оптика дыма.** Значительный интерес вызывают поглощение света сажей [78], изменение поглощения от состава и морфологии (формы) дыма, изменение поглощения при физическом и химическом старении дымового аэрозоля, а также зависимость этих параметров от длины волны. Для наших целей достаточно рассмотреть оптические коэффициенты сажи для двух длин волн: одной из них, относящейся к средней части видимого диапазона ( $\sim 550$  нм), и другой — теплового, или длинноволнового, инфракрасного ( $\sim 10$  мкм) диапазона.

Большое число измерений с различными сортами сажи в видимом диапазоне длин волн привело к значениям удельного поглощения [78] в интервале от малых значений  $3\text{--}4$  м<sup>2</sup>/г до высоких  $10\text{--}12$  м<sup>2</sup>/г [36, 38, 39, 79—81]. Однако, когда данные были отнормированы относительно величины удельного поглощения элементарного углерода (ЭУ), то диапазон изменения удельного поглощения уменьшился до  $6\text{--}11$  м<sup>2</sup> на 1 г ЭУ. Для источников сажи, имеющих отношение к проблемам физики атмосферы, среднее удельное поглощение  $7$  м<sup>2</sup>/г сажи соответствует длинам волн  $550$  нм [82]. Опытный факт, согласно которому удельное поглощение сажи относительно независимо от способа появления сажи (или характеристик ее размеров), находится в согласии с теорией поглощения света сажеподобными фрактальными агрегатами [83].

Предполагается, что удельное поглощение сажи уменьшается с ростом агрегатного размера частицы, если агрегаты с увеличением размера становятся более компактными. Исследования с образцами чистого углерода показали значительное уменьшение поглощения солнечного излучения, если начальный (затравочный) размер агрегата превышал эквивалентный размер сферы порядка  $0,4$  мкм [84]. Предварительные данные лабораторных измерений, показали, что уменьшение поглощательной способности сажи, вызванное коагуляцией, может достигать  $30\%$  [85] с окончательным значением величины удельного поглощения, остающимся  $\geq 6$  м<sup>2</sup>/г. Применимость этих результатов к атмосферным условиям требует проверки.

Конденсация влаги или паров горючих материалов на поверхности сажевых кластеров может влиять на морфологию (форму) этих частиц и, следовательно, на их оптические и физические свойства [86]. Новые лабораторные исследования свойств сажевых агрегатов, образованных при старении плотного, богатого сажей дыма в течение  $16$  ч, показали, что действие перенасыщенных паров (пересыщение  $\leq 3\%$ ) приводит к очень слабым изменениям оптических свойств [36, 81, 87, 88]. Даже большие сажевые агрегаты при очень больших значениях перенасыщения, достигающих до  $90\text{--}130\%$ , проявляют пренебрежимо малое уменьшение удельного поглощения (от  $6,9$  до  $6,7$  м<sup>2</sup>/г) [36] и оказывают небольшое влияние на уменьшение мощности света (на  $23\text{--}45\%$  для сажи за время старения от  $0,54$  до  $4$  ч) [87].

Когда сажа смешана с непоглощающими веществами (такими, как масла или сульфат аммония), удельное поглощение обычно остается в диапазоне от  $6$  до  $11$  м<sup>2</sup>/г ЭУ [79, 89]. В разбавленных смесях сажи с водой и в случае сажи на поверхности водяных капель поглощательная способность сажи (на единицу массы) может реально возрастать от  $10$  до  $100\%$  [90].

Спектральная зависимость ослабления света [78] дымом, богатым сажей, была измерена недавно в факеле дыма над пожаром большого резервуара с керосином [91]. Эти наблюдения показали, что экстинкция медленно падает с увеличением длины волны, при этом сажа остается сильным поглотителем [78] в большей части видимого диапазона спектра

(от 0,35 до 1,0 мкм), однако это не остается верным для дыма от свежесгоревшей растительности [91].

Что касается длин волн инфракрасного диапазона, то для них коэффициенты поглощения (и экстинкции) сажи меньше, чем для длин волн видимого диапазона [92]. Экстраполяция данных по горению резервуаров [91] вместе с предполагаемыми зависимостями [92], а также независимо полученная информация по прохождению излучения CO<sub>2</sub>-лазера в саже [93, 94] показали, что поглощательная способность волн тепловой, инфракрасной части спектра раз в десять меньше, чем волн видимого диапазона. Прямое сравнение поглощательной способности сажи ацетиленового происхождения для длин волн в 515 нм и 10,6 мкм дает отличие на множитель ~11 [93]. Новые лабораторные измерения свойств «городского» дыма говорят о том, что этот фактор может доходить до ~30 [38, 97]. В других исследованиях сажи, происходящей из дизельного топлива, было найдено, что ее поглощательная способность на длине волны 10 мкм была ~0,8 м<sup>2</sup>/г (а коэффициент экстинкции ~1,0 м<sup>2</sup>/г) независимо от того, присутствовали в ней большие сажевые агрегаты или нет [94].

В противоположность указанным выше данным о сильной поглощательной способности сажи в оригинальных исследованиях климатических последствий ядерной зимы [2, 3] были использованы относительно низкие значения удельного поглощения порядка 1,5—2 м<sup>2</sup>/г, для всех сортов дыма. По данным по оптическим свойствам дыма для длинноволновой, инфракрасной области спектра, начиная с ранних работ, не произошло никаких значительных изменений.

**Старение и реакция.** Старение частиц сажи может изменить их оптические и физические свойства [98]. Коагуляция приводит к образованию более крупных частиц, у которых, согласно теории Ми [83, 99], может уменьшиться значение удельного поглощения. Сильно агломерированные [85] и компактные (почти сплошные формы) сажи [84] проявляют такие свойства. Поглощение частицами сажи сульфатов и других непоглощающих веществ незначительно влияет на поглощательную способность сажи, но могут сделать их более подверженными вымыванию (см. ниже). В очень плотных дымах, появляющихся при тлении, часто происходит коагуляция с образованием частиц больших размеров, сопровождающаяся их очевидным влиянием на оптические свойства дыма [100], и сажа может захватываться этими дымами.

Фотохимическое старение сажи может происходить при аккреции (нарастании) неорганических веществ (таких, как сульфаты) и при разрушении. Например, хорошо известно [101], что образцы чистого графита и углерода вступают в реакцию с озоном, которого много в верхней атмосфере. Ранее предполагалось, что среднее время жизни сажи относительно реакции с озоном (для стратосферных концентраций) может достигать ~1 месяца [102]; новые лабораторные исследования показывают, что эта реакция значительно более медленная: даже при самых благоприятных условиях химическое время жизни сажевых частиц не менее 1—2 лет [103]. Многочисленные характерные признаки показывают, что сажа на самом деле — долгоживущее образование в атмосфере [104]. Соответственно время пребывания и удаления образованной во время военных действий сажи контролируется динамическими и микрофизическими процессами [2].

В течение длительного временного периода удаление тропосферной сажи с осадками будет наиболее эффективным. В одном из полевых экспериментов [105] был определен коэффициент вымывания сажи городского

типа порядка  $4,8 \cdot 10^5$ . Типичные значения коэффициента вымывания для сульфатов находятся в диапазоне  $(4-80) \cdot 10^5$  [106]. При нормальных атмосферных условиях сажа является малой составляющей в фоновом гидроскопическом аэрозоле (в существенной степени сульфатном) [98, 107]. Однако в случае свежееинжектированной в атмосферу сажи эффективность ее вымывания оказывается значительно ниже, чем для фонового аэрозоля [105, 108]. Очевидно, сажа «внутренне» не перемешивается с окружающими аэрозолями за малые времена (от нескольких часов до дней).

В оригинальном исследовании TTAPS [2] старение дыма при коагуляции было учтено явным образом (см. примечание в [99]), однако в нем было пренебрежено химическими реакциями, которые могут уменьшить количество сажи, тем не менее это оказалось в согласии с новейшими лабораторными результатами.

**Региональное рассеяние.** Региональное (или мезомасштабное) рассеяние больших дымовых факелов было исследовано при помощи математического моделирования [109–112], взятия проб над пожарами [113] и анализа исторических данных [114]. В течение первых нескольких дней рассеяния дыма могут быть значительными коагуляция частиц и их вымывание. К счастью, наши возможности моделирования регионального поведения больших аэрозольных факелов значительно улучшились за последние годы [110, 111]. Результаты модельных расчетов вкупе с фотографиями со спутников показывают, что дым в течение нескольких дней распространяется на территорию масштаба полушария [115], и если предполагать, что частицы дыма являются хорошими ЯКО [110], то до трети дыма может быть вымыто в фронтальных системах в течение первых нескольких дней.

Действие дымовых факелов регионального масштаба, вызванных большими лесными пожарами, качественно выяснено из исторических данных о погоде [116, 117]. Современный метеорологический анализ указывает, что пожары в провинции Альберта (Канада) в 1982 г. были ответственны за уменьшение средних дневных температур на  $1,5-4^\circ\text{C}$  поверхности к северу от центральных районов США [114]. Совсем недавно крупномасштабные пожары в Китае, в мае 1987 г., привели к уменьшению дневных температур на Аляске на  $2-6^\circ$  [114]. В этих примерах минимальные значения ночных температур изменялись незначительно. Величины дневного охлаждения согласуются с теоретическими ожиданиями влияния дыма лесных пожаров на температуру поверхности (с учетом их специфических оптических свойств [39]) [2, 118].

В сентябре 1987 г. серия больших пожаров возникла в южной части Орегона и северной части Калифорнии. На единый трехнедельный период густой дымовой покров окутал долину реки Кламат. Отмеченные дневные значения температуры были на  $20^\circ\text{C}$  ниже ожидаемых [114], хотя ночные значения температуры были не ниже нормальных для этого времени года. Почти в то же самое время большой сплошной дымовой факел двинулся на юг в сторону от пожаров Орегона вдоль побережья Калифорнии. Этот факел сохранял свою целостность в течение нескольких дней. Два дня группа исследования физики облаков с самолетов получала и изучала образцы дыма в эксперименте «Лагранжиан» [113]. При этом наблюдалось, как частицы дыма удвоили за 44 ч свой первоначальный размер, а удельный коэффициент рассеяния дыма уменьшился за это время приблизительно на 25%. Через два дня свойства дыма явно «заморозились» из-за разбавления дымового факела, которое затормозило дальнейшее «старение» дыма [99].

Естественные облака пыли дают другую возможность изучения рассеяния аэрозолей, коагуляции, вымывания и радиоактивного переноса [110, 119]. Пыль производится в больших количествах также при ядерных взрывах на поверхности и вблизи нее и имеет непосредственное отношение к проблемам ядерной зимы [120]. Значительное охлаждение поверхности обычно наблюдается под плотными облаками пыли, поднятыми ветром [119].

Стоит отметить, что дымы городского типа, обладающие значительной большей поглощательной способностью, чем дымы лесных пожаров, обычно инжектируются и в более высокие слои атмосферы и производят более сильный эффект охлаждения поверхности [2, 118]. В настоящее время есть наблюдательные данные [121] и вычислительные подтверждения [109—111, 122] того, что нагрев дымовых облаков солнцем в первые несколько дней приведет к индуцированному подъему дыма и ускоренному мезомасштабному рассеянию.

В ранних оценках последствий ядерной зимы [2, 3], подтверждаемых наблюдениями крупномасштабных пожаров естественного происхождения и явлений, относящихся к ним, для простоты предполагалось, что облака пыли, образованные в ядерной войне, будут рассеяны по площади полушария в течение одной или двух недель [2]. Как оказалось, это предположение соответствует современным данным.

**Оптические толщины.** Для того чтобы изучить потенциально возможные воздействия эмиссии дыма на глобальные изменения климата, должны быть оценены оптические толщины облаков дыма, находящихся на большой территории. Оптическая толщина поглощения [78] на длинах волн видимого диапазона (особенно на 550 нм) является наиболее употребимым параметром и рассчитана здесь в предположении, что инжектированный дым однородно распределен над Северным полушарием.

Данные табл. II наводят на мысль о том, что средние по полушарию значения оптических толщин поглощения (2—3) будут возникать при полномасштабном ядерном обмене ударами (между странами НАТО и Варшавского договора). Даже наименьшее значение оптической толщины  $\sim 0,24$  (в табл. II) означает потенциально возможное снижение солнечного излучения по полушарию до 35% [124]. Интенсивные ядерные атаки на городские и промышленные центры при относительно низком суммарном выходе энергии ( $\sim 100$  Мт) способны произвести дымовую завесу со средним значением оптической толщины  $\geq 1$  (см. Сценарии поджига выше). Атаки на маслоочистительные заводы даже при меньшем значении энергии [28] могут также приводить к средним значениям оптической толщины около 1. Оценки эмиссий дыма и оптических толщин чувствительны к сценарию детонаций, который предсказать невозможно. Однако при существующих богатых ядерных арсеналах [23] нельзя ожидать в глобальной войне ограниченного или избирательного поражения целей [4]. Большое разнообразие сценариев обмена ядерными ударами без учета избирательного поражения может привести к условиям, описываемым данными табл. II [3].

Основываясь на данных о запасах из табл. I и об эмиссии дыма, обсуждавшихся ранее, можно оценить верхний предел для оптической толщины поглощения, усредненного по полушарию. Рассматривая только мировые запасы строительной древесины, сырой нефти, пластмасс и асфальтных покрытий, можно получить, что верхний предел оказывается приблизительно равным 19. При этом не учитываются потенциально возможные эмиссии сажи, происходящей из угля и природного газа, нефтепродуктов резины, бумаги, красок и многих других горючих материалов.

Таблица II. Потенциально возможные значения оптических толщин поглощения сажи<sup>а</sup>

Горючие материалы	Количество сгоревшего вещества Тг <sup>б</sup>	Эмиссионный фактор сажи	Выделение сажи, Тг	Оптические толщины поглощения
Древесина/лесо-материалы	4000 (2000—6000)	0,01 (0,002—0,02)	40 (4—120)	0,88 (0,05—4,3)
Первичные нефтепродукты	400 (200—600)	0,06 (0,03—0,10)	24 (1,5—50)	0,54 (0,07—2,2)
Вторичные нефтепродукты	200 (50—500)	0,06 (0,03—0,10)	12 (5—30)	0,27 (0,2—1,8)
Пластмассы/полимеры	200 (100—300)	0,08 (0,05—0,10)	16 (5—30)	0,36 (0,06—1,1)
Асфальтовые покрытия	125 (60—200)	0,10 (0,06—0,13)	12,5 (3,6—26)	0,28 (0,04—0,9)
Растительность	150 (150—750)	0,003 (0,001—0,005)	0,45 (0,15—3,8)	0,010 (0,002—0,14)
Общее количество	5075 (2560—8350)	—	105 (20—290)	2,3 (0,24—10,4)

<sup>а</sup> Оптические толщины поглощения усреднены по Северному полушарию (см. комментарии в [78]). Наиболее вероятные значения параметров обоснованы в тексте; также представлен диапазон изменения каждого параметра и соответствующей оптической толщины. Коэффициент поглощения сажи принят равным  $7 \text{ м}^2/\text{г}$  (из диапазона  $4 - 10 \text{ м}^2/\text{г}$ ), а эффективность быстрого вымывания принята равной 20 % (из диапазона 10—25%). Все величины внутри указанного диапазона изменения каждого параметра считаются равновероятными. Тем не менее результирующее распределение вероятности для оптической толщины не постоянно вдоль диапазона изменения, а имеет максимум около среднего значения. Диапазон, заданный для оптической толщины, может грубо быть интерпретирован, как ожидаемый  $(1 - \sigma)$ -предел (см. [123]).

<sup>б</sup> Предполагается, что 50% древесины, асфальтовых покрытий и пластмасс стран НАТО и ОВД, указанных в табл. I, сгорят в пламени (из диапазона 25—75%); также предполагается, что запасы первичных нефтепродуктов, составляющие 50% (из диапазона 25—75%) мировых запасов (или 80% запасов стран НАТО и ОВД), будут сильно уязвимы для возгорания во время ядерной войны. В отношении к запасам вторичных нефтепродуктов предполагается, что сгорит ~50% из наличия стран НАТО и ОВД; нижнее значение для диапазона изменения составляет половину величины наименьшей из оценок для запасов [16], а верхнее составляет 75% величины максимальной оценки [17]. Для растительности нижнее значение горючего принято на основе работы Смолла и Буша [21], диапазон изменения выбран согласно современным оценкам ([21, 22]; см. также [125]).

которые могут увеличить общую эмиссию сажи на 10—20% [2, 4, 17]. Также пренебрегается вкладом пожаров растительности [125] и высотных инъекций пыли [120]. В последних сценариях дымовых инъекций SCOPE [9] принимался эквивалентным для полушария диапазон оптической толщины поглощения от 0,3 до 3,0; поскольку никаких вероятностных характеристик не было связано с этими значениями, то они могут рассматриваться как равновероятные [126]. Диапазон оптических толщин SCOPE попадает в пределы диапазона, определенного табл. II.

В начальный период эмиссии дыма в атмосферу, следующий за обменом ядерными ударами, но прежде, чем дым займет территорию масштаба полушария (т. е. в первую или вторую неделю конфликта), локальные значения оптической толщины будут иметь случайный характер с величинами, значительно отличающимися от средних по полушарию. В это время под дымовыми облаками может стать очень темно и произойдут значительные понижения температур поверхности [111, 114].

В исходной численной модели TTAPS [2] и оценках NRC [3] средние по полушарию значения оптических толщин были приблизительно равными 1,4; значение оптической толщины для городского дыма в модели TTAPS было около 1,1. Эти значения оптических толщин лежат около центра диапазонов оптических толщин поглощения, которые обсуждались выше.

### Влияние на климат.

Острая фаза (первые 1–3 месяца). В настоящее время хорошо понятно, что протяженные слои дыма охлаждают лежащую под ними поверхность Земли [2–4, 9, 10]. При оптических толщинах поглощения  $\gg 0,5$  основное воздействие сводится к уменьшению солнечного нагрева поверхности без достаточного для компенсации переноса инфракрасного излучения [127] из атмосферы [2, 4, 118]. При малых оптических толщинах поглощения ( $\ll 1$ ) предсказывается легкий нагрев находящейся вблизи поверхности тропосферной сажи, как это происходит в арктической мгле [128]. Вероятно, этот эффект может привести к заметным последствиям только на очень поздних стадиях в последовательности событий ядерной войны и недостаточно велик, чтобы считаться важным. Однако если сажа окажется над арктическим льдом, то энергетический баланс поверхности может сильно измениться [129–131].

Всеохватывающие модельные исследования были проделаны для того, чтобы определить влияние больших эмиссий дыма на изменение температуры поверхности и атмосферы, на направление циркуляции, выпадение осадков и солнечный нагрев [132]. Различные прогнозы для температур поверхности Земли обобщены на рис. 3 [2, 17, 75, 111, 118, 133–151]. Наиболее серьезные нарушения происходят в первую очередь на средних широтах Северного полушария и в субтропиках. Из результатов последней трехмерной общей циркуляционной модели (GCM) следует, что инъекции дыма в июле приводят к понижению температуры поверхности Земли в среднем по зоне 30–70° с. ш. на ~5 °С (за пятидневный период) в случае малых инъекций дыма (оптическая толщина ~0,3), на ~13 °С в случае средних по величине инъекций дыма (оптическая толщина ~1) и на ~22 °С при сильных инъекциях дыма (оптическая толщина ~3). Максимальное краткосрочное понижение температуры во внутренних областях континентов достигает 30–35 °С и более, кроме того, в первый месяц на средних широтах может происходить промерзание и подмораживание поверхности на больших территориях.

Возмущения температуры из-за инъекции дыма, происходящих в другое время года, оказываются значительно меньшими в зимний период, когда солнечный нагрев уже и без того ограничен; предсказывается вызванное дымом охлаждение лишь на несколько градусов. При весенних инъекциях дыма происходит несколько меньшее, чем при летних, понижение температуры, однако из-за первоначальной, более низкой температуры вероятность подмораживания и промерзания значительно выше. На более низких широтах охлаждение сдерживается несколькими факторами, включающими более позднее поступление дыма в эти районы и более теплый и влажный климат на этих широтах. Тем не менее GCM предсказывает возможное охлаждение на ~10° С и более на субтропических широтах Северного полушария. При более сильных инъекциях дыма (оптические толщины поглощения ~3) значительное подмораживание может достигнуть субтропиков. Предсказанное понижение температуры, даже при малых инъекциях дыма, означает потенциально возможную гибель урожая в районах низких широт [5].

Рассчитанные изменения выпадения осадков в течение острой фазы оказались очень сильными. Среднее уменьшение дождей над сушей в июле на широтах от 30 до 70° с. ш. составило ~75% [148] и сравнимо для широкого диапазона оптических толщин (от 0,3 до 3). Для широт от 0 до 20° с. ш. уменьшение осадков изменяется от ~25% для малых оптических толщин

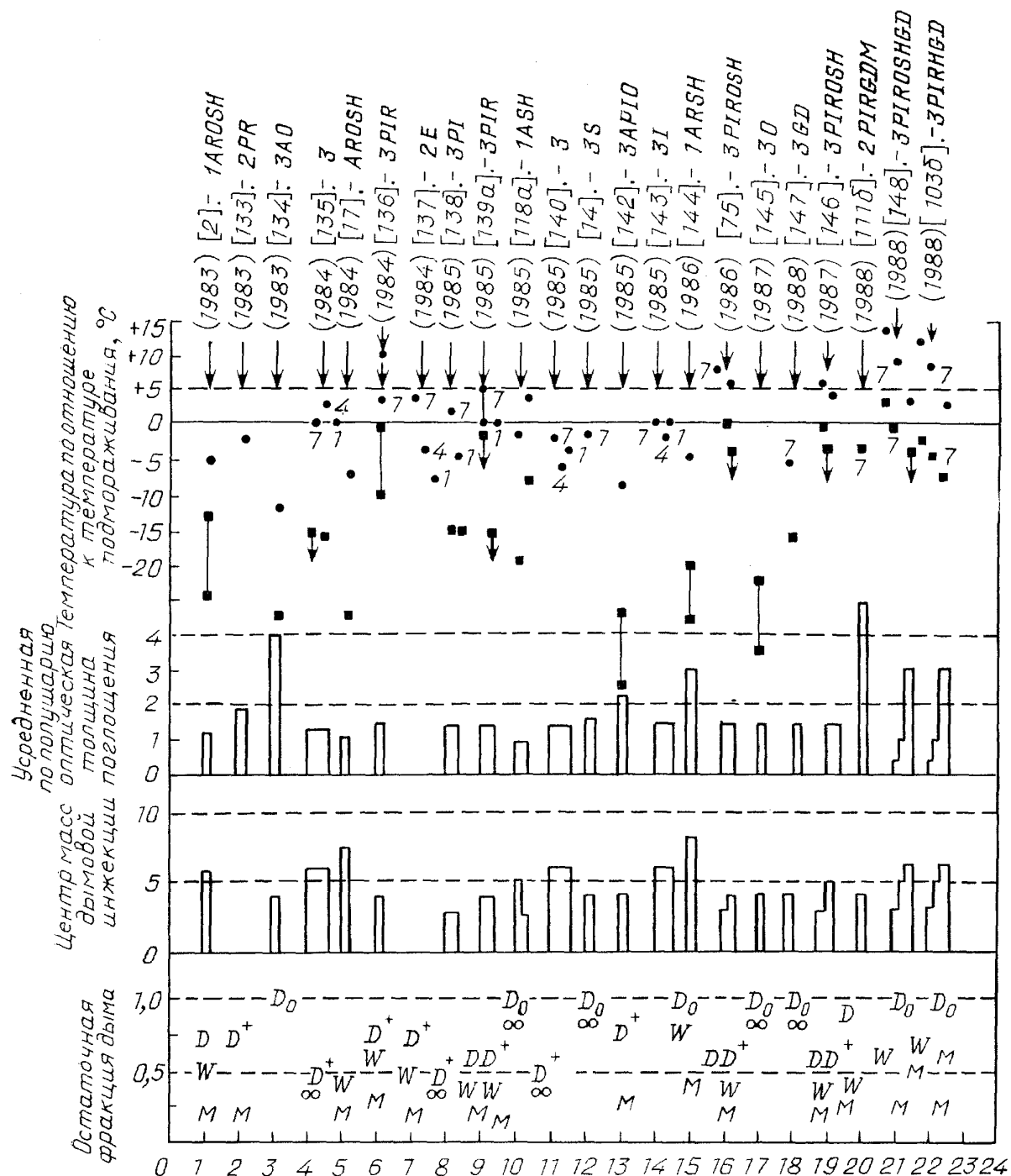


Рис. 3. Сводка результатов расчетов по различным моделям ядерной зимы. Приведены следующие данные а) ● — средние значения температуры поверхности суши (побережье и острова), полученные в расчетах для регионов, находящихся под слоями дыма в самый холодный, 1—2-недельный период (в некоторых сообщениях даны только величины изменения температуры; абсолютные значения температур определены путем вычитания этих значений из данных по средним сезонным температурам из этих сообщений); месяц, для которого проведен расчет, указан цифрой; для 1 — D-излучательно-конвективных моделей среднее понижение температуры суши принято равным половине понижения температуры «всей суши» с целью учета регулирующего влияния океанов [2]; данные о среднегодовых значениях солнечного излучения также использованы в этих случаях. б) ■ — минимальные значения температуры поверхности суши, находящейся под слоями дыма. При моделировании острой фазы ядерной войны (так же, как и выше, где было необходимо, восстанавливались абсолютные значения температуры вычитанием величины ее понижения); значения этих температур усреднены за период в один день. в) Средние по полушарию значения оптических толщин поглощения дымовых инжекций. г) Высота центра масс дымовой инжекции. д) Фракции остаточного дыма на нескольких временных интервала в каждом из моделирований (использованные символы определяются ниже). Представленные данные получены на основе работ [2, 17, 75, 111, 118, 133—149]; некоторые значения были оценены на основе анализа данных из соответствующих публикаций, однако неболь-



до ~60—75% в случае более плотного дыма [148]. В большинстве расчетов предсказано разрушение летнего Азиатского муссона. Уменьшение уровня освещения в первые недели и месяцы также значительно. Среднее уменьшение солнечного излучения над Землей на широтах от 30 до 70° с. ш. достигает ~40% при низких количествах дыма и ~90% при высоких [148, 149]. На низких широтах (0—20° с. ш.) среднее уменьшение солнечного излучения изменяется от ~0 до 50%.

Интересно, что все расчеты изменения климата, проведенные за последние пять лет, предсказывают сильное охлаждение под протяженными дымовыми облаками (с оптической толщиной поглощения ~1) при большом диапазоне модельных предположений относительно высот инъекции дыма, скоростей вымывания, для различных условий приземного слоя атмосферы и эффектов переноса излучения (см. рис. 3). Климатологические возмущения, возникшие в первые дни и недели, следующие за главным обменом ядерными ударами, будут беспрецедентными в истории человечества. Разные прогнозы дают понижение температуры поверхности Земли (усредненное для прибрежных и внутренних районов за самый холодный недельный период), отличаясь менее чем на 50% в зависимости от модельных предположений о параметрах дыма (см. рис. 3). Далее, основные средние по полушарию температуры поверхности падают ниже значения 5 °С — «базовой линии», которая может быть грубо охарактеризована как лежащая в «зимнем» режиме. Во всех моделях появляются температуры подмораживания даже в середине лета, хотя диапазон и продолжительность событий замерзания различаются значительно.

**З а т я ж н а я   ф а з а   ( п е р в ы е   1—3   г о д а ).** Исходная теория ядерной зимы предсказывала, что протяженные слои дыма будут нагреваться и стабилизироваться относительно выпадения и солнечный нагрев будет приводить к перемещению дыма на большой скорости [2] в Южное полушарие. Эти предсказания основывались на наблюдениях аналогичных явлений в природе [152] и физических доводах. Они были подтверждены более современными модельными расчетами и наблюдениями [121, 122, 139]. Эти явления важны ввиду того, что стабилизация дыма определяет ход долговременных климатических последствий ядерной войны, а перенос между полушариями потенциально определяет ее действие на все страны [4, 13].

шое число данных нам было недоступно (они не попали на рисунок). Выбранные результаты расчетов приблизительно соответствуют рекомендованным «базисным» сценариям инъекции дыма [3, 4, 9]. Менее и более серьезные случаи также исследовались, но не так часто, как базисные. Результаты исследований расположены слева направо приблизительно в соответствии с хронологией и пронумерованы вдоль нижней части рисунка. В каждом исследовании может быть проиллюстрировано несколько случаев. (Например, результаты Рамасвами и Килля проиллюстрированы двумя профилями инъекции.) Данные каждого моделирования расположены вертикально. *Температура:* ● — средняя температура поверхности суши, находящейся под слоями дыма (МАХ); ■ — в глубине суши (max); # — месяц года. *Использованные характерные температуры:* 0 °С — для зимы, 13 °С — среднегодовая, для осени и весны, 25 °С — для лета; 35 °С — некоторые другие случаи. *Характеристики моделей:* 1,2,3 — размерности; *A* — среднегодовое солнечное излучение, *P* — пятнистые дымовые инъекции, *I* — интерактивный перенос, *O* — учтены оптические свойства, *S* — рассеяние включено в модель, *H* — дым активный в инфракрасном диапазоне, *E* — энергетический баланс, *G* — теплоемкость Земли. *D* — суточные вариации, мезомасштаб (48 ч). *Вымывание дыма:* *D* — день (быстрое вымывание); *D<sub>0</sub>* — условно выбранная величина, начальной инъекции; *W* — неделя; *M* — месяц; + — предположения, неявно принятые в избранном сценарии процессов с участием дыма; ∞ — нет вымывания дыма после инъекции

Результаты последних численных моделей инжекции дыма в июле [146, 148, 149] показывают, что 25—40% первоначальной инжекции дыма при маловысотных инжекциях будет стабилизировано относительно выпадения (см. профиль NCAR на рис. 2) и до 60% — при высотных инжекциях (профиль SCOPE на рис. 2). Присутствие оставшегося дыма в атмосфере по этим расчетам составляет  $\sim 1$  год. Более того, уже через три недели после инжекции дым распространяется по всей площади Северного полушария и над большей частью площади Южного полушария (при первоначальных областях инжекции, находящихся в Северной Америке, Европе или западной части Азии). Среднее глобальное значение оптической толщины поглощения оставшегося дымового слоя доходит до значения  $\sim 0,5$ , которое достаточно для того, чтобы вызвать основные нарушения энергетического баланса [153].

Долговременные климатические последствия с трудом поддаются оценке из-за сложной роли механизмов обратной связи, которые все еще плохо представлены в глобальных моделях климата [154]. Часть исследований была посвящена специфическим вопросам, таким как изменение альбеда снежного и ледяного покровов в результате выпадения сажи [129—131]. Эти исследования показали, что значительные температурные аномалии (в несколько градусов и более) могут появляться в послевоенном поведении климата. Небольшое число долговременных (до  $\sim 1$  года) расчетов при использовании GCM (глобальных климатических моделей) было проделано с упрощенными предположениями о физике дыма или с невысоким пространственным разрешением [145, 148, 150]. На этом временном масштабе оказывается критической реакция поверхности океана, хотя в модели океанические процессы были учтены грубо. Так, было предсказано, что температура поверхности океана понизится на 2—6 °C и как следствие этого произойдет увеличение ледяного покрова, поэтому можно было ожидать значительного охлаждения климата во время второго послевоенного лета [137].

Представляют значительный интерес нарушения климата в Южном полушарии, следующие за крупными инжекциями дыма на средних широтах Северного полушария. Очевидно, климатические последствия по сравнению с таковыми в Северном полушарии будут значительно ослаблены. Расчеты затяжной ядерной зимы для Австралии [151, 155] показывают понижение средней температуры поверхности суши на 2—4 °C, морской поверхности на 2—3 °C, ослабление осадков до  $\sim 50\%$ , а уменьшение солнечного излучения и длительности светового дня составит  $\sim 20$ —30% в летний период. Ожидается, что эти последствия значительно снизят продуктивность сельского хозяйства [5].

Геофизические данные подтвердили основные, предсказываемые моделями ядерной зимы климатические последствия. Очевидно, нет надежных аналогов для ядерной зимы, однако существуют крупномасштабные явления с участием аэрозолей и изменением климата, которые часто имеют с ней сходные физические причины. Последние прямые подтверждения температурных изменений при ядерной зиме, вызванных дымом лесных пожаров, обсуждались выше [114]. Уже давно известно, что вулканические извержения приводят к мелкомасштабным, но значительным климатическим изменениям [156]. Расчеты энергетического баланса [157, 158] и анализ записей температуры [159] согласуются в оценке глобального охлаждения на  $\sim 0,3$  °C за период 1—3 года, следующий за крупными вулканическими извержениями. Ведущиеся исследования марсианских пыльных бурь [152] укрепляют наши возможности в предсказании глобальных

климатических последствий, вызванных прохождением излучения через аэрозоли.

Палеонтологические данные свидетельствуют о том, что около 75 % всех видов животных, включая всех динозавров, вымерло в третичный период (Cretaceous — Tertiary, или К — Т) 65 млн лет назад. Было высказано предположение, что это произошло в результате «метеоритной» зимы [160] мирового масштаба. Геохимический анализ показал аномально высокие значения концентраций сажеподобных частиц углерода в тех же ископаемых пластах, что и содержащих повышенные концентрации иридия метеоритного происхождения [161]. Когда будет достоверно установлено происхождение этой сажи, тогда может появиться информация, важная для приложений в современных моделях ядерной зимы.

**Уменьшение озона.** Новые численные расчеты нарушений стратосферного озонового слоя, вызванных крупными инъекциями дыма и окислов азота ( $\text{NO}_x$ ), предсказывают возможность длительного (на несколько лет) глобального, на 50% и более, уменьшения озона [162]. Расчеты, выполненные с использованием GCM с учетом интерактивного переноса дыма и озона, а также реакций  $\text{NO}_x$ , показывают, что нагретое облако дыма (во время ядерной войны), поднимаясь в стратосферу Северного полушария физически перемещает слой окружающего озона в направлении Южного полушария.  $\text{NO}_x$ , перемешанная с дымом, затем в фотохимических процессах разрушает оставшийся озон. Согласно модели, нагрев наполненного дымом воздуха до 100 °С приводит к ускорению разрушения озона [144]. За двадцать дней озоновый слой в Северном полушарии уменьшается в среднем на 40–50%. Грубо говоря, одна половина этого уменьшения происходит из-за перемещения озона, а другая — из-за химического разрушения [166]. В региональном масштабе происходит даже еще более значительное уменьшение озона. «Озоновая дыра» ядерной зимы позволит биологически опасному ультрафиолетовому солнечному излучению (UV-B) (усиленному на 100–200% и более) попадать на поверхность Земли в течение продолжительного периода [163]. Уменьшение озона будет продолжаться в течение первого года [1–4], хотя потенциально достижимое уменьшение озона все еще остается неопределенным. Судьба перемещенного в Южное полушарие озона также должна еще быть определена.

**Степень неопределенности и рекомендации.** Степень неопределенности расчетов климатических последствий эмиссий дыма в течение ряда лет обсуждалась в ряде работ (см. ссылки в [3, 4, 12]). Специфичная для ряда явлений неопределенность была отмечена в этом обзоре. Как и для любой, другой сложной геофизической проблемы, для существующих прогнозов изменения климата во время ядерной зимы отсутствует надежная методология определения общей степени неопределенности. Степень неопределенности в оценке реакции климата на крупные инъекции дыма была значительно уменьшена за время, прошедшее от первых сообщений в 1982–1983 гг. [1, 2]. Оставляя в стороне вопрос о неопределенностях в сценариях поджига, которые никогда не могут быть полностью устранены [164], существующие данные указывают на то, что значительные, глобального масштаба нарушения климата следует ожидать вслед за крупным обменом ядерными ударами [10].

В дополнение к климатическим аномалиям, которым было уделено внимание в этом обзоре, опасные последствия будут вызваны радиоактивными осадками [4, 165], химическими токсичными веществами [4, 166] в

разрушением структур здравоохранения и других гражданских инфраструктур, способствующих выживанию человечества [167].

Приведем основные характеристики климата и процессов, требующие дальнейшего определения:

1. Эффективность начального выведения и вымывания сажи индуцированными осадками из факелов больших пожаров.
2. Значения факторов эмиссии и оптических коэффициентов поглощения сажи, появляющейся во время крупных пожаров.
3. Рассеяние плотных дымовых облаков на площади регионального масштаба и эффекты их взаимодействий с синоптическими, погодными системами.
4. Детальная информация об энергетическом балансе поверхности при наличии устойчивых протяженных слоев дыма, включая влияние образования тумана, растительного покрова и суточных воздействий.
5. Долговременные (от нескольких месяцев до нескольких лет) глобальные аномалии климата, вызванные остаточным дымом, и неофизические механизмы обратной связи, которые могут быть активизированы.
6. Роль пыли, поднятой ядерными взрывами, в появлении кратковременных и продолжительных атмосферных оптических аномалий и климатических последствий.
7. Развитие и продолжительность процессов уменьшения стратосферного озона. «Озоновая дыра» ядерной зимы с площадью масштаба полушария и соответствующая интенсификация ультрафиолетового излучения.

Укажем и другие важные эффекты, развивающиеся одновременно с изменением климата, исследование которых необходимо из-за их влияния на общие последствия ядерной войны:

1. Динамика возгорания и распространения пожаров в естественных и городских массивах топлива.
2. Химические возмущения, включающие выбросы (эмиссии) токсичных соединений, загрязнение воздуха вредными веществами [168] и широкомасштабное заражение воды, воздуха и почвы.
3. Радиоактивные осадки, выпавшие как сразу, так и через продолжительное время; как локальные, так и глобальные; возникающие как в результате взрыва бомб, так военного и гражданского оборудования, а также складов отработанных материалов. Облучение как за короткое, так и за продолжительное время.
4. Реакция сельскохозяйственных систем (и других ключевых экосистем) на комбинацию последствий изменения температуры, солнечного излучения, выпадения осадков, ультрафиолетового излучения и других физических и атмосферных факторов [5, 11].
5. Влияние разрушений в медицинских, психологических, экономических и других общественных системах на послевоенный стресс, выживание и выздоровление [167].

Большинство из этих вопросов представляет большой интерес для научного сообщества и относится к проблемам окружающей среды в независимости от проблемы ядерной зимы.

**Заключение.** Наше понимание причин и климатических последствий, к которым приводит сажа во время ядерной войны, значительно продвинулось со времени первых работ на эту тему [1, 2]. Первичные физические следствия, такие как ослабление солнечного излучения, охлаждение поверхности, высотное нагревание и стабилизация, а также ускоренный

перенос между полушариями (объединение эффектов, предложенных гипотезой «ядерной зимы» [2]) были подтверждены на базе сильно развитого теоретического и экспериментального анализа. Отличия появились в основном при уточнении величины эффектов. Хотя существенная доля неопределенности и сохранилась и еще больше работы предстоит сделать, однако укрепилось понимание основных физических принципов ядерной зимы. Анализ долговременных широкомасштабных последствий ядерной войны для окружающей среды показывает, что значительное количество запасов горючих материалов сгорит при ядерном конфликте. Серьезные аномалии, ведущие к более трагичным для человечества последствиям, чем сама ядерная зима [5, 9, 11], являются наиболее вероятными, а не отдаленно возможными,

*Благодарности.* Мы благодарим за полезные советы и плодотворные дискуссии Э. Эндерса, Д. Оутена, Д. Бейкон, Дж. Бэркса, Т. Банча, Р. Хуана, А. Кларка, У. Коттона, В. Кроппера, П. Крутцена, Д. Филдса, С. Гхэна, Х. Глатцмайера, Г. С. Голицына, Х. Гровера, Р. Хаберле, Дж. Хэллетта, Р. Харрисона, М. Харуэлла, П. Хоббса, Дж. Хадсона, М. Мак-Кракена, Р. Мэлоуна, С. Маркуса, Дж. Митчелла, Ж. Малхолланда, Е. Пэттерсона, Дж. Пеннера, И. Персивала, А. Б. Питтока, Р. Пюшеля, Л. Радке, А. Робока, Ф. Роджерса, Б. Стокса, С. Шнейдера, Д. Силвера, Р. Смолла, Г. Л. Стенчикова, С. Стивенса, С. Томпсона, Ж. Триполи, Д. Уорда, Д. Вестфаля, Р. Б. Уилльямсона и Б. Зака.

(Перевод с англ. В. Л. Бычкова)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ И ПРИМЕЧАНИЙ

- [1] *Crutzen P. J., Birks J. W.* // *Ambio*. 1982. V. 11. P. 114.
2. *Turco R. P., Toon O.B., Ackerman T. P., Pollack J.B., Sagan C.* // *Science*. 1983. V. 222. P. 1283: Global Atmospheric Consequences of Nuclear War / Rep. U 122878.— R&D Associates, Marina del Rey, CA, March 1983.— 144 p.; Global Consequences of nuclear «warfare» / *EOS*. 1982. V. 63. P. 1018.  
Из начальных букв фамилий авторов данных сообщений был составлен акроним TTAPS.
3. National Research Council [NRC].— The Effects on the Atmosphere of a Major Nuclear Exchange.— Washington, DC: National Academy of Sciences, 1985.— 195 p.
4. *Pittock A. B., Ackerman T. P., Crutzen P. J., MacCracken M. C., Shapiro C. S., Turco R. P.* Environmental Consequences of Nuclear War. V. 1: Physical and Atmospheric Effects. SCOPE-28.— Chichester: John Wiley and Sons, 1986.— (Перевод: Последствия ядерной войны: Физические и атмосферные эффекты.— М.: Мир, 1988).  
SCOPE — акроним от Scientific Committee on Problems of the Environment of the International Council of Scientific Unions.
5. *Harwell M.A., Hutchinson T. C.* Environmental Consequences of Nuclear War. V. 2: Ecological and Agricultural Effects. SCOPE-28.— Chichester: John Wiley and Sons, 1985.— (Перевод: Последствия ядерной войны: Воздействие на экологию и сельское хозяйство.— М.: Мир, 1988).
6. *Golitsyn G. S., MacCracken M. C.* Atmospheric and climatic consequences of a major nuclear war: Results of recent research / WCP-142.— Geneva: World Meteorological Organization, 1987.— 25 p.
7. *McIntosh L. A.* Select Bibliography on Nuclear Winter.— Pacific Sierra Research Corp., 1987.— Note 743. March.— 25 pp.
8. Программа США была организована Отделом политики в области науки и техники Белого дома (the White House Office of Science and Technology Policy) с руководством в лице организации Defence Nuclear Agency и при участии научных представителей десятков университетов, национальных лабораторий и частных компаний. Программа включает обширные экспериментальные исследования как в полевых, так и в лабораторных условиях и теоретический

- анализ. Ежегодно проводится обзор и обобщение материалов по данной программе (см., например, Defence Nuclear Agency Report DASIAC-TN-87-35-VI, — April 1987. — 388p.) Большая часть материалов, к которым мы обращаемся в этой статье, получена при поддержке, оказанной в рамках этой программы.
9. *Warner F. et al.* // *Environment*. 1988. V. 30, No. 5. В этом номере журнала находится несколько статей, посвященных физическим, биологическим и радиологическим эффектам ядерной зимы.  
Также см.: *Warner F. et al.* Severe global-scale effects of nuclear war reaffirmed // *Environment*. 1987. V. 29, No. 4.
  10. Study on the Climatic and other Effects of Nuclear War / United Nations Rep. A/43/351. — May 1988. — 70 p.
  - [11] Биологические последствия ядерной зимы (и важнейшие из них по воздействию на сельское хозяйство), описанные в докладе SCOPE (см. [5]), были независимо рассмотрены организацией Committee on Interagency Radiation Research and Policy Coordination и Отделом политики в области науки и техники США, которыми было найдено, что, вероятнее всего, все последствия были недооценены: см.: Science Panel Report. 5 (ORAU 88/B-85). — March, 1988.
  12. *Levi B. G., Rothman T.* // *Phys. Today*. 1985. V. 38. P. 58.  
*Broyles A. A.* // *Am. J. Phys.* 1985. V. 53. P. 323.  
*Penner J.* // *Nature*. 1986. V. 324. P. 222.  
*Colbeck I., Harrison R. M.* // *Atmos. Env.* 1986. V. 20. P. 1673.  
*Golitsyn G., Phillips N.A.* WMO Rep. WCP-113. — 1986.  
*Berger A.* // *Trans. Am. Geophys. Soc., EOS*. 1986. V. 67. P. 617.  
*Schneider S. H., Thompson S. L.* // *Nature*. 1988. V. 333. P. 221.
  13. *Sagan C.* // *Forcing Affairs*. 1983—1984. V. 62. Winter.  
*Turco R. R., Sagan C.* // *Ambio*. 1989. V. 18, No. 7. P. 372.  
*Sagan C., Turco R. P.* A Path Where No Man Thought: Nuclear Winter and the End of the Arms Race. — New York: Random House, 1990.  
В связи с существованием возможности ядерной зимы, по мнению авторов, в основных направлениях политики следует сделать следующие шаги: уменьшить уровень стратегического вооружения примерно в 100 раз, установить минимум сдерживания в ~100 боеголовок, полностью исключить тактическое ядерное оружие, отказаться от стратегических систем защиты, которые находятся в противоречии с договором по межконтинентальным баллистическим ракетам.
  14. *Simonett D. C., Barrett T. N., Gopas S., Holzmuller F. J., Sun G.-Q., Veregin H.* Magnitude and spatial distribution of urban flammable materials in the San Jose area, California / UCRL-15794. — Lawrence Livermore National Laboratory. — October 1986. — 77 p.  
На основе детальной схемы для большой площади сельской местности в Сан-Хосе была определена средняя топливная загрузка в 9,2 кгс/см<sup>2</sup>; в оценку не включены сырая нефть и нефтяные продукты, асфальтовые покрытия и аналогичные материалы. Эти дополнительные горючие материалы добавляют к полной загрузке топливом по оценкам порядка 4 кг/м<sup>2</sup>.
  15. США производят порядка 45 Тг (1 Тг = 10<sup>12</sup> г = 1 млн тонн) пиломатериалов ежегодно, Советский Союз — порядка 55 Тг, а все государства вместе взятые — порядка 225 Тг. Такое производство, грубо говоря, было постоянным в течение нескольких десятилетий (Statistical Yearbook, 1979/80. — New York: United Nations, 1981). Числа даны для ежегодных объемов пиломатериалов. Мы выбрали среднее значение плотности выдержанных лесоматериалов 0,5 г/см<sup>3</sup>. «Время жизни» лесоматериалов в постройках в США составляет порядка 40 лет (оценивая все лесоматериалы в постройках в 1800 Тг — по данным Бинга [16] — и деля это число на величину их производства 45 Тг/год). Использование этих данных для оценки количества лесоматериалов в других странах дает величину глобально накопленной массы 9000 Тг.
  16. *Bing G.* Estimates of total combustible material in NATO and Warsaw Pact Countries / Lawrence Livermore National Laboratory Rep. UCRL-93192. — 1985.  
Бинг оценил запасы всех целлюлозных материалов в США и странах НАТО, а также в странах ОВД и получил 2100 и 6400 Тг соответственно. Эти количества можно увеличить на множитель 1,15, соответствующий развитым странам (*Penner J.* // *Nature*. 1986. V. 324. P. 222), и получить величину запасов в 7400 Тг. Из этого общего количества по нашим оценкам около 85% составляют лесоматериалы (в постоянных и временных постройках), 10% — фанера, прессованный картон и филенка, 5% — бумага, картон и ткани. Поэтому на основе данных Бинга можно получить, что запас лесоматериалов в США составляет 1800 Тг, на страны НАТО и ОВД — 5500 Тг и 6300 Тг на весь развитый мир. Оценка Бинга для первичных запасов сырой нефти составляет величину порядка 480 Тг в странах НАТО

- и ОВД. Поскольку на эти страны приходится 66% всей потребляемой нефти (см. выше ссылку на работу: *Penner J.*), первичные запасы нефти можно оценить в ~730 Тг. Аналогично значения, приводимые Бингом для асфальтовых покрытий в странах НАТО и ОВД ~ 335 Тг, могут при экстраполяции для всего мира дать значение 500 Тг. Для пластмасс Бинг приводит значение 343 Тг в странах НАТО и ОВД, которое может быть отнормированно на коэффициент 1,15, как это сделано выше, и для всех развитых стран дать величину около 400 Тг.
17. *Crutzen P. J., Galbally I. E., Bruhl C.* // *Climatic Change*. 1984. V. 6. P. 323. Для развитых стран по оценкам масса целлюлозных материалов в целом составляет 15 000 Тг, из которых 1000 Тг приходится на бумагу, картон и соответствующие продукты. Из оставшихся 14 000 Тг древесных и строительных материалов 90% составляют пиломатериалы и соответствующие продукты, или 126 000 Тг. Для асфальтовых покрытий в мире полный учет дает по грубой оценке ~250 Тг, а для пластмасс ~460 Тг.
18. Производство кругляка в мире по грубым оценкам превосходит в четыре раза производство пиленого дерева, но по величине сильно различается между государствами (*Statistical Yearbook 1979/80.*— New York: United Nations, 1981). Большое количество кругляка используется как горючее.
19. Вторичные запасы включают в себя топливо, находящееся в резервуарах небольших размеров: в домах, на фабриках, на бензоколонках, горючее в автоцистернах и других передвижных резервуарах. Военные базы, гражданские аэродромы и другие транспортные мощности также могут иметь местные (значительных размеров) резервуары для хранения горючего.
20. *Turco R. P.* Recent assessments of the environmental consequences of nuclear war // *Medical Implications of Nuclear War* / Eds. F. Solomon, R. Q. Warston.— Washington: National Academy Press, 1986.— P. 96.
- В этой работе проведен детальный анализ производства и накопления пластмасс.
- [21] *Small R. D., Bush B. W.* // *Science*. 1985. V. 225. P. 465.
- Bush B. W., Small R. D.* Smoke produced by nonurban target-area fires following a nuclear exchange / *Defence Nuclear Agency Report DNA-TR-85-293-A.*— 1985. 160 p. Ignition of silo-field vegetation by nuclear weapons / *Defence Nuclear Agency Report DNA-TR-86-220-V1.*— 1986.— P. 23. and *Comb. Sci. Tech.* 1987. V. 52. P. 25.
22. *Ackerman T. P., Stenback J. M., Turco R. P., Graver H. D.* Land use, biomass estimates, and potential smoke emissions for United States missile fields//*Climatic Change*. 1990. (принято в печать).
23. *Arkin W. M., Fieldhouse R. W.* Nuclear Battlefields.—Cambridge, Mass.: Ballinger, 1985.
- Cochran T. B., Arkin W. M., Hoenig M. M.* Nuclear Weapons Databook.— Cambridge, Mass.: Ballinger, 1984.— V. 1; 1987.— V. 2.
24. Высокая вероятность возникновения городских пожаров под действием теплового излучения ядерного взрыва была обнаружена в работах:
- Brode H. L., Small R. D.* Fire Damage and Strategic Targeting // *Defence Nuclear Agency Report DNA-TR-84-308-V3.*—Washington, B.C., 1984.
- Small R. D., Larson D. A., Brode H. L.* Fires from nuclear weapons bursts // *Report. DNA-TR-84-308-V4.* — 1984.
- Brode H. L.* / *Pacific Sierra Research Corporation Report 1802.*— Santa Monica, CA. 1988.
- Эффект так называемого воспламенения «на бис» обеспечивает почти мгновенное образование крупномасштабных пожаров, когда потоки тепла превышают 20 кал/см<sup>2</sup> (см. работу: *Backovsky J.* Early time fire phenomenology / *Report DNA-TR-85-146-V2.*— 1985.— V. 2.
- Вторичные пожары, возникающие в процессах разрушения взрывной волной, увеличивают общую площадь поджига, в частности, на большом расстоянии от эпицентра взрыва (см. работу: *Backovsky J., Alger R. S.* Early time fire phenomenology, V. 1: Secondary Fires.— *Report DNA-TR-85-146-V1.*— 1985).
- Распространение огня в городских районах, лишенных противопожарной защиты и с тысячами возможных точек возгорания, будет быстрым и в конечном итоге может увеличить более чем вдвое площадь, пострадавшую от пожара (см. работы: *Kang S.-W., Reitter T. A., Takata A. N.* Analysis of large urban fires. // *AAIA Paper 85-0457.* Reno, NV.— 1985; *Reitter T. A., Takata A. N., Kang S.-W.* I Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL—91268.— 1984.— 19 p. *Reitter T. A.* / *Ibidem.* Report UCRL-20910.— 1986.— 37 p.; см. также [4].— Appendix 3A, P. 87—103).
25. *Small R. D., Bush B. M., Dore M. A.* // *Aerosol. Sci. and Tech.* 1989. V. 10. P. 37; *Pacific Sierra Research. Corp. Report.* 1761.— 1987.

*Bush B. W., Small R. D.* // Defence Nuclear Agency Report DNA-TR-86-220-V2.— 1982.

Цели, проанализированные в этих работах, основывались на списке неклассифицированных целей, представленном Отделом защиты (Department of Defence) Министерства обороны США, для оценки возможностей поражения и разрушения.

26. Факт присутствия городов в списках стратегических целей обсуждается в ряде сообщений (см., например: *Siegel R.* Strategic Targetting options.— Cambridge, MA: The MIT Press, 1981;  
*Gayler N.* The Consequences of Nuclear War.— Hearings, 98.— The Congress, House — Senate Joint Economic Committee U. S.: Government Printing Office, 1986).
  27. *Sastry M. A., Romm J.J., Tsipis K.* Nuclear crash: The U.S. economy after small nuclear attacks. Program in Science and Technology for international Security/Rep. № 17.—Cambridge, MA; Mass. Inst. Tech., 1987.—P. 111.
  28. Согласно данным, представленным на рис. 1, около двух третей очистных мощностей сырой нефти могут быть разрушены ~200 боеголовками, обладающими энергией от 1 до 10 килотонн, в местах их расположения в воюющих странах и у союзных государств. При этом выделившаяся энергия составит ~0,2—2 мегатонны. Одновременные удары по главным хранилищам масел, не находящимся вблизи с нефтехранилищами, могут удвоить эти цифры. Если же объектами бомбардировки будут только страны НАТО в ОВД, то число боеголовок, необходимых для уничтожения двух третей мировых запасов, надо удвоить (т. е. ~0,8 — 8 мегатонн). Хотя известно, что нефть является главной целью ядерных ракет, мы не должны предполагать, что она будет единственной целью.
  29. *Haynes B. S., Wagner H. Gr.* //Prog. Energy Combust. Sci. 1981. V. 7. P. 229.
  30. Обычно шарики имеют плотность порядка 1,9 г/см<sup>3</sup>; для сравнения — плотность чистого графита составляет 2,25 г/см<sup>3</sup> (см.: *Medalia A.I., Richards L. W.* // J. Colloid. Interface Sci. 1972. V. 40. P. 223).
  - [31] *Mulholland G. W., Mountain R. D., Baum H.* /National Bureau of Standards Report NBSIR 86-3342.— Washington, D. C.: U. S. Department of Commerce. 1986.
- В работе показано, что фрактальная размерность свежих сажевых агрегатов оказывается порядка 1,8 и остается относительно неизменной при коагуляции частиц сажи.
32. *Wells A. C., Venn J. B., Heard M. J.* // Inhaled Particles IV / Ed. W. H. Walton.— Oxford: Pergamon, 1977.— 175 p.
- Эти авторы проводили эксперименты с сажей, производимой маленьким двигателем внутреннего сгорания. Одновременно при помощи электронного микроскопа проводилась запись изменения морфологии сажевых частиц, происшедшего при вдыхании и выдыхании их людьми. При вдыхании сажа в течение нескольких секунд находилась в легких в условиях высокой влажности, и было замечено, что за это время она коллапсировала в относительно компактные сферообразные кластеры.
33. *Turco R. P., Golitsyn G. S.* // Environment. 1988. V. 30. P. 8.
  34. Компоненты несажевого происхождения тоже могут эффективно рассеивать свет и поэтому также воздействовать на климат, если достаточно большое их количество присутствует в воздухе. Если ~10 Тг чистой сажи достаточно для создания значительных возмущений в переносе излучения, то ~100 Тг рассеивающего дыма (или пыли) потребуется для получения сопоставимого эффекта (см. [2, 3]).
  35. Экспериментальные наблюдения показывают, что выход дыма (сажи) в пожарах, начиная от размера поленицы дров и кончая размером с комнату, увеличивается при уменьшении подвода кислорода в зону горения (см. работы: *Tewarson A., Steciak J.* Fire Ventilation // Factory Mutual Research Corp. Report JI-OEON6.RC-070(A).— 1982;  
*Tewarson A., Lee J.L., Pion R.F.* The influence of oxygen concentration on fuel parameters // 18th Symposium (International) on Combustion.— Pittsburgh: The Combustion Institute, 1980.— P. 563). и при увеличении размера пожара (см. сообщения: *Mulholland G.* / DNA Global Effects Meeting, NASA Ames Research Center.— 1986. Febr. 252—27; *Tewarson A.* / Conf. on Large Scale Fire Phenomenology.— Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards.— 1984. Sept. 10—13).
- Хотя имеется очень мало данных по выходу сажи при более крупных (чем указанные выше) пожарах, но хорошо известно, что эффективно образующие сажу горючие вещества, такие как сырая нефть и резина, приводят к образованию очень плотных черных облаков в условиях свободного горения на большой



- площади (см. работу: *Davies R. W.* // *Adv. Geophys.* 1959. V. 6. P. 413). Данные ограниченного числа полевых экспериментов показывают, что образование сажи при пожарах хранилищ керосина увеличивается в три раза при увеличении площади пожара от  $\sim 10$  до  $\sim 100$  м<sup>2</sup> (см. работу: *Zak B.* // *DNA Global Effects Meeting.*— Santa Barbara, CA, 1988, Apr. 19–21, ссылку [42], а также примечание в [43]).
36. *Mulholland G. W., Baum H., Bryner N., Quintiere J.* Smoke emission and optical property measurements at NBS / Progress Report.— Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards, 1988.— Presented at the DNA Global Effects Meeting. Santa Barbara. CA, 1988. Apr. 19–21.
  37. *Dod R. L., Brown N. J., Mowrer F. W., Novakov T., Williamson R. B.* // *Aerosol Sci. and Tech.* 1989. V. 10. P. 20.
  38. *Golitsyn G.S., Shukurov A. K., Ginsburg A. S., Sutugin A. G., Andronova A. V.* // *Isvestia — Atmos. and Ocean. Phys.* 1988. V. 24. P. 227.  
*Andronova A. V., Kostina E. M., Kutov A. S., Minashkin V. M., Pirogov S. M., Obvintsev Y. I., Sutugin A. G.* // *Ibidem.* P. 235.
  39. *Patterson E. M., McMahon C. K.* // *Atmos. Env.* 1984. V. 18. P. 2541.  
*Patterson E. M., McMahon C. K., Ward D. E.* // *Geophys. Res. Lett.* 1986. V. 13. P. 129.
  40. Результаты некоторых старых данных суммированы в [17, 20]; в них средний фактор эмиссии полагается величиной порядка 7.5%. Более поздние мелко-масштабные эксперименты дали следующие результаты: согласно работам Малхолланда и др. [36]. фактор эмиссии для полиуретана — 10%; Голицын и др. [38] для сажи, происходящей из различных пластмасс, экспериментально получили величину  $\sim 10\%$ ; Теварсон определил величины факторов эмиссии от 5 до 10% для стирола, этилена, уретана и винилхлорида (см. работу: *Tewarson A.* // *Fire Workshop.*— London: Royal Society, 1984. Apr. 16–17).
  - [41] Сводка более поздних данных находится в статьях, включенных в ссылки [1–4, 17].
  42. *Einfeld W., Mokler B. V., Zak B.D., Morrison D. J.* A characterization of smoke particles from small, medium and large-scale hydrocarbon pool fires // *Abstr. Am. Assoc. Aerosol. Res. Annual Meeting.* /Eds. M. J. Pilat, E. J. Davies.— Seattle, WA, 1987.— P. 54.
  43. Факторы эмиссии сажи  $\sim 9\%$  были получены в серии пожаров хранилищ керосина площадью 170 м<sup>2</sup> [42]. Однако предварительные данные по горению такого же топлива, но на площади  $\sim 800$  м<sup>2</sup> дали для факторов эмиссии величины от 2 до 5% со случайными значениями  $\sim 9\%$  (*Zak B., Radke L.* Частное сообщение, 1988). Продолжительность этих пожаров была значительно меньше ( $\sim 2$ –10 мин), чем предыдущих.
  44. *Radke L. F., Hegg D.A., Lyons J.H., Brock C. A., Hobbs P. V.* // *Aerosols and Climate* /Eds. P. V. Hobbs, M. P. McCoimick.— Hampton, VA: Deepak Publ., 1988.— P. 411.
  45. Малхолланд получил результаты, согласующиеся с данными измерений в пожарах на древесной основе, рассмотренных в [3, 17] (см. работу: *Mulholland G.* // *DNA Global Effects Meeting.*— NASA Ames Research Center., 1986. Febr. 25–26). Некоторые хорошо вентилируемые пожары эмитируют менее 0.1% сажи, а на основе фанеры типично — около 0.2% (см. [37]).
  46. *Muhlbaier J. L., Williams R. L.* // *Particulate Carbon: Atmospheric Life Cycle* /Eds. G. T. Wolff, R. L. Klimisch — New York: Plenum, 1982.— P. 185.
  47. Под термином «захват» мы подразумеваем попадание дыма в водяные капли и кристаллы льда в результате таких процессов, как коагуляция и броуновская диффузия. Под термином «вымывание» мы подразумеваем очистку облаков от дыма гидрометеорами (осадками) на землю или меньшие высоты. Очевидно, что эффективность вымывания меньше эффективности захвата и может быть значительно меньшей.
  48. Было предложено, что сажа может эффективно захватываться пылью, поднятой ветром и частицами пепла от больших пожаров (см. работу: *Porch W. H., Penner J. E., Gillete D. A.* // *Atmos. Env.* 1986. V. 20. P. 919). Однако этот механизм недостаточно эффективен, чтобы иметь какое-то значение в общем случае (см. работу: *Turco R. P., Toon O. B., Ackerman T. P.* // *Almos. Env.* 1987. V. 21. Pp. 1247, 2065).
  49. *Cotton W. R.* // *Am. Scientist.* 1885. V. 73. P. 275. Также имеются неопубликованные материалы расчетов следующих авторов: *Tripoli G. J.* Colorado State University, Fort Collins; *Pruppacher H. R.* Max-Planck-Institute, Mainz; *Banta R. M.* Air Force Geophysical Laboratory, Hanscom AFB; *Bacon D. P.* Science Applications Inc., McLean, VA.

50. *Edwards L. L., Penner J. E.* Potential nucleation scavenging of smoke over large fires; a parametric study // Lawrence Livermore National Laboratory Report UGRL-96242.— Livermore, CA, 1987.— 10 p.  
*Bradley M. M.* Numerical simulation of nucleation scavenging within smoke plumes above large fires // Report UCRL-95036.— 1986.— 10 p.  
 В большинстве исследований, проведенных в Ливерморе, все частицы предполагались смачиваемыми и поэтому могли быть легко захватываемыми при нуклеизации. При моделировании физических процессов в облаках также пренебрегали процессами с участием частиц льда, которые приводят и к уменьшению скорости вымывания сажи (см. [49]). Даже при таких условиях предсказываемая эффективность вымывания типично меньше 60%.
- [51] *Pruppacher H. R., Klett J. D.* Microphysics of Clouds and Precipitation.— Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1978.
52. *Charlson R. J., Ogren J. A.* // Participate Carbon: Atmospheric Life Cycle / Eds. G. T. Wolff, R. L. Klimisoh.— New York: Plenum, 1982.— P. 3.  
 Гидрофобные материалы отталкивают воду, а гидрофобные частицы с трудом нуклеизуются при нормальном пересыщении. Гидрофильные материалы притягивают воду, а гидрофильные частицы легко смачиваются при низком пересыщении. Гидроскопические материалы впитывают воду и образуют капли при значениях относительной влажности ниже значений насыщения, а гидро-скопические частицы лучше всех нуклеизуются в облаках.
53. *Hallett J., Hudson J. G., Rogers C. F.* // Aerosol Sci. Tech. 1989. V. 10. P. 70; Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-21059.— 1988.— 30 p.
54. *Hallett J., Gardiner B., Hudson J., Rogers F.* Cloud Condensation and ice nucleation of a range of carbonaceous aerosols // Proc. Conf. on Cloud Phys.— Snowmass, CO: Amer. Meteorol. Soc.: 1986.— P. 9.
55. *Radke L.F., Benech B., Dessens J., Eitgroth M. W., Henrion X., Hobbs P. V., Ribon M.* // Proc. Third WMO Conference on Weather Modification. Clermont-Ferrand, 1980. July 21—25.— Geneva: World Meteorological Organization, 1980.  
 В этой работе непосредственно измерены концентрации ЯКО (при ~1—3%-ном пересыщении) в сажевом факеле при сгорании масел в устройстве метеотрон; их величины составляли  $10^2 - 3 \cdot 10^2 \text{ см}^{-3}$  при полной концентрации частиц  $10^4 - 10^5 \text{ см}^{-3}$ . Хэллетт и др. (см. [54]) изучали свойства ЯКО, образованных из сажи ацетиленового происхождения, выделенной в лабораторных условиях, и из сажи, получившейся при горении большого резервуара дизельного топлива. При временах старения сажи  $\leq 1 \text{ ч}$   $\leq 10\%$  частиц были активны как ЯКО при пересыщениях ~1% (типичных для конвективных облаков).
56. *Benner W. H., Hansen A. D. A., Novakov T.* // Aerosol Sci. and Tech. 1989. V. 10. P. 84.  
 Сажа попала в конденсирующийся туман при неизвестном значении пересыщения, которое могло превышать 5—10%; доля захваченной сажи изменялась от 10 до 95%, при этом доля уменьшалась по мере увеличения концентрации сажи.
57. *Twomey S.* Atmospheric Aerosols.— New York: Elsevier, 1977.
58. Концентрация этих частиц может изменяться от  $\sim 10^2$  до  $\sim 10^4 \text{ см}^{-3}$  в зависимости от интенсивности пожара и условий на Земле; частицы почвы обычно являются превосходными ЯКО [51].
59. По всей вероятности, дым при медленном горении обильно создает ЯКО, так же, как и дым, возникающий при сгорании растительности [42, 53].  
*Eagen R. C., Hobbs P. V., Radke L. F.* // J. Appl. Meteorol. 1974. V. 13. P. 553.  
 В данной работе измерено значение ЯКО в факеле лесного пожара, которое оказалось порядка  $6 \cdot 10^{10}$  на грамм дыма. Хэллетт и др. [54] нашли, что дым из испарившегося масла очень активен как источник ЯКО. Поэтому предполагается, что многие частицы дыма, образующиеся при медленном горении (и первоначально отделенные от частиц сажи), будут преимущественно участвовать в нуклеизации.
60. *Squires P.* // Tellus. 1958. V. 10. P. 256.  
*Hudson J. G.* // J. Atmos. Sci. 1983. V. 40. P. 480.
- [61] *Ludlam F.H.* Clouds and Storms.—University Park: The Pennsylvania State University Press, 1980.  
 В этой работе показано, что интенсивные естественные конвективные системы могут обеспечивать эффективность внедрения осадков на уровне 20%.
62. Ряд детальных исследований, посвященных инъекции и вымыванию сажи в крупномасштабных пожарах, был проделан исследователями, указанными в комментариях к [49], а также в [67—71]. Результаты отличаются друг от друга в соответствии с предполагаемой активностью частиц сажи в качестве исход-

- ных ЯКО. На основе результатов полевых и лабораторных исследований по калибровке ЯКО [53] предсказываются очень малые части вымытой сажи.
63. Частицы сажи, первоначально не являющиеся ЯКО, могут с течением времени трансформироваться в активные ЯКО при присоединении к себе таких гидроскопических веществ, как сульфаты или нитраты, или при коагуляции с уже существующими ЯКО. Однако не очевидно, что значительные изменения могут произойти за те несколько минут, за которые сажа достигает зоны конденсации в поднимающемся вверх факеле пожара. Например, обычно на протекание химических реакций требуется от нескольких часов до нескольких суток. Характерное время коагуляции с ЯКО (при концентрации ЯКО  $10^5 \text{ см}^{-3}$ ) составляет несколько часов.
64. В то время как число захваченных частиц может быть малым, часть захваченной массы может быть значительно большей, если самые крупные частицы являются самыми активными ЯКО. Крупные частицы также наиболее эффективно собираются при механических процессах [51]. В настоящее время не существует данных, однозначно подтверждающих, что существует распределение по размерам сажевых ЯКО. Однако данные одной серии предварительных экспериментов говорят о том, что нет выделенного размера для ЯКО по отношению ко всей совокупности частиц (данные: *Hallett J., Rogers F.* Desert Research Institute.— 1986,— частное сообщение).
65. Хоббс (H. Hobbs, Univ. of Washington) предложил механизм, согласно которому может увеличиваться вымывание сажи. Это происходит, если частицы сажи являются активными ЯКО, а факел пожара содержит достаточное количество больших (с размером, необходимым для осаждения) твердых частиц, поднятых ветром. В этом случае частицы сажи, нуклеизовавшиеся в капли радиусом  $\sim 1\text{--}10 \text{ мкм}$  могут собираться падающими остатками органических веществ. Скорость механизма зависит от эффективности нуклеизации сажи и от необходимого количества гигантских частиц.
66. *Fields D. E., Cole L. L., Summers S., Yalcintas M. G., Vaughan G. L.* // *Aerosol Sci. and Tech.* 1989. V. 10. P. 28. В данной работе проведен анализ образцов стены, окрашенной черным дождем в Хиросиме (один из образцов был представлен Филдсу нами). В частицах, извлеченных из стены, присутствовал элементарный углерод. Однако морфология (сажа или уголь) не была определена. Банч также зарегистрировал элементарный углерод на поверхности аналогичных образцов стены (*Bunch T.* NASA Ames Research Center. 1987, частное сообщение).
67. *Penner J. E., Haselmart L. C., Jr., Edwards L. L.* // *J. Climate Appl. Meteorol.* 1986. V. 25. P. 1434.
68. *Tripoli G. J., Kang S.-W.* A numerical simulation on the smoke plume generated by a hypothetical urban fire near San Jose, California // Paper BA.01.87.— SCOPE — ENUWAR Bangkok Workshop, 1987. Febr. 9—13.  
Было найдено, что загородная зона Сан-Хосе будет сгорать с достаточной интенсивностью для того, чтобы инжектировать дым на высоту между 4 и 13 км.
69. *Heikes K. E., Ransohoff L. M., Small R. D.* Early smoke plume and cloud formation by large area fires // Defense Nuclear Agency Report DNA-TH-87-176.— Washington, DC, 1987.— P. 92.  
*Small R. D., Heikes K. E.* // *J. Appl. Meteorol.* 1988. (в печати).  
*Small R. D., Larson D. A., Brede H. L.* // *J. Heat Transfer.* 1984. V. 106. P. 318.  
*Small R. D., Larson D. A.* // *Israel J. Tech.* 1984/5. V. 22. P. 173.
70. *Bacon D. P., Sarma R. A., Procter F. H.* Smoke injection into the atmosphere from large area fires // *J. Climate Appl. Meteorol.* 1987 (принято в печать).
- [71] *Marcus S., Krueger S., Rosenblatt M.* Numerical simulation of near-surface environments and particulate clouds generated by large area fires // Defence Nuclear Agency Report DNA-TR-87-1.— Washington, DC, 1987.— P. 122.
72. Мы изучали контролируемое горение растительности на площади от  $\sim 1$  до  $\sim 100 \text{ га}$ , которое инжектировало дым на высоты от 1 до 6 км (см. работу: *Turco R.* Memorandum on the Chapleau Fire.— Los Angeles, CA: R&D. Associates, August 1985.— P. 10).  
Пожары, вызванные ядерными устройствами, могут занимать до  $10^6 \text{ га}$  с инжекцией дыма на большие высоты.
73. *Pyne S. J., Omi P. N.* Wildland fires and nuclear winters // Defence Nuclear Agency Report DNA-TR-85-396.— Washington, DC, 1986.— P. 176.
74. Стокс (*Stocks B.* Canadian Forestry Service, частное сообщение, 1986) сообщил, что сильный лесной пожар вблизи местности Рэд-Лэйк (Онтарио) 29 мая 1986 г. сжег за один день  $100 \text{ км}^2$  лесов, подняв при этом дым на высоту 14 км над Зем-

лей (оцениваемый средний расход топлива составлял  $1,4 \cdot 10^5$  т /ч, что соответствует мощности  $\sim 10^6$  МВт).

75. *Thompson S. L., Schneider S. H.* // *Foreign Affairs*, 1986. V. 65. P. 981.
76. Разумная оценка массы воды, инжектируемой конвекцией при пожарах на высоту средней части тропосферы, дает величину  $\sim 10^4$  Тг (что приблизительно в 100 раз больше массы дыма); ограничения по влажности поверхности и осадкам из конвективных «холодных ловушек» предупреждают реализацию значительно больших значений инъекций воды. Естественная конвекция ежедневно перераспределяет  $\sim 10^6$  Тг воды, в то время как общая масса воды в атмосфере составляет  $\sim 10^7$  Тг.
77. Парциальное давление пара в стабилизированном факеле пожара при полном давлении 100 мбар будет в общем случае меньше 2 мм рт. ст. (т. е. эквивалентно начальному значению влажности поверхности  $\sim 20$  мм рт. ст. без учета увлечения осушенного воздуха при подъеме дыма). Это соответствует точке замерзания  $-10^\circ \text{C}$  (263 К). Если предположить, что температура окружающего воздуха  $-50^\circ \text{C}$  (223 К) при 100 мбар, то конденсированная вода исчезнет, если воздух останется неразбавленным, но нагреется приблизительно на  $40^\circ \text{C}$  или если температура останется постоянной, но влажный дым будет разбавлен окружающим воздухом при 100 мбар, грубо говоря, в отношении 1/100. Достаточный нагрев и разбавление будут происходить за время масштаба 1 дня (см. раздел «Региональное рассеяние» и соответствующие ссылки).
78. Поглощение света сажей можно охарактеризовать средним удельным поглощением (коэффициентом или показателем поглощения)  $\sigma_a$  (м<sup>2</sup>/г сажи). Безразмерная оптическая толщина поглощения слоя сажи тогда определяется на основе выражения

$$\tau_a = \sigma_a m_s l,$$

где  $\tau_a$  — оптическая толщина поглощения,  $m_s$  — массовое распределение сажи в воздухе (г/м<sup>3</sup>), а  $l$  — толщина слоя сажи вдоль вертикали (м). Если полная масса сажи задана, то можно оценить

$$\tau_a = \sigma_a M_s A^{-1},$$

где  $M_s$  — полная масса сажи (г), а  $A$  — предполагаемая ею занимаемая площадь,  $A = 2,5 \cdot 10^{14}$  м<sup>2</sup> для полушария. Оптическая толщина поглощения, получающаяся из данных о массе сгоревшего топлива, может быть оценена как

$$\tau_a = \varepsilon \sigma_a M_f A^{-1},$$

где  $\varepsilon$  — средний фактор эмиссии сажи (г сажи/г топлива),  $M_f$  — масса топлива (г). Иногда удельное поглощение рассматривают относительно массы сгоревшего топлива; в этом случае  $\sigma_a \equiv \varepsilon \sigma_a$  и  $\tau_a = \sigma_a M_f / A$ . Обычно для богатого сажей дыма рассеяние света меньше поглощения:  $\sigma_s < \sigma_a$ . Показатель экстинкции представляет собой сумму показателей рассеяния и поглощения ( $\sigma_e = \sigma_s + \sigma_a$ ), альбедо однократного рассеяния определяется как  $\omega_0 = \sigma_s / \sigma_e$ . Типичные значения  $\omega_0$  для сажи в видимом диапазоне длин волн 0,1–0,4.

79. Эти исследования включают следующие работы:  
*Lin C. I., Baker M., Charlson R. J.* // *Appl. Opt.* 1973. V. 12. P. 1356.  
*Clarke A. D.* // *Ibidem.* 1982. V. 21. P. 3011.  
*Roessler D. M., Faxvog F. R.* // *J. Opt. Soc. Am.* 1979. V. 69. P. 1699; 1980. V. 70. P. 230.  
*Rohl A. et al.* // *Appl. Opt.* 1982. V. 21. P. 375.  
*Patterson E. M., Marshall B. T.* // *Ibidem.* P. 387.  
*Clarke A. D., Waggoner A. P.* // *Ibidem.* P. 398.  
*Weiss R. E., Waggoner A. P.* // *Particulate Carbon: Atmospheric Life Cycle.*— New York: Plenum, 1982.— P. 317.  
*Heintzenberg J.* // *Atmos. Env.* 1982. V. 16. P. 2461.  
*Rosen H., Hansen A. D. A., Gundel L., Novakov T.* // *Appl. Opt.* 1978. V. 17. P. 3859.
80. *Lee K. T.* Generation of soot particles and studies of factors controlling soot light absorption.— Ph. D. Thesis.— University of Washington, 1983.
- [81] *Harrison R. M., Colbeck I., Hardman E. J., Appleby L.* An experimental study of the optical properties of combustion — generated fractal clusters // *Abstracts Am. Assoc. Aerosol Res. Annual Meeting* // Eds. M. J. Pilat, E. J. Davis.— Seattle, WA, 1987.— P. 78.

82. Это значение точно не известно из-за недостаточных возможностей измерительной техники (*Clarke A. D.*, частное сообщение) и из-за изменчивости свойств сажи; неопределенность оценивается в +40%.
83. *Berry M. V., Percival I. C.* // *Optica Acta*. 1986. V. 33. P. 577.  
*Berry M. V., Nelson J., Percival I. C.* // *Reports at the Symposium on Smoke Generation and Properties*.— London: Royal Society, 1986. December 3. (Nelson J.— Univ. of Bristol; Percival I.— Univ. of London).  
*Nelson J.* // *Nature*. 1989. V. 339. P. 611.
84. *Medalia A. I., Richards L. W. II J.* *Colloid Interface Sci.* 1972. V. 40. P. 233.  
*Jansen J.* // *Appl. Opt.* 1980. V. P. 2977.  
Сфера эквивалентного объема использована для измерения агрегатного размера.
85. В группе исследователей из Эссекса (*Colbeck J., Hardman E., Harrison R. M.*— Univ. of Essex) наблюдали, как удельное поглощение одного образца неразбавленной сажи, находившегося в резервуаре в течение 16 ч, уменьшилось от 9 до 6 м<sup>2</sup>/г. В группе из Лидса обнаружили, что у сажи, образованной на основе толуола, при старении в течение трех часов удельное поглощение уменьшалось с 14 до 10 м<sup>2</sup>/г (сообщение: *Clarke A. G., Papapanayotou Y.* (Univ. of Leeds) // *Smoke Symposium*.— London: Royal Society, 1986. December).
86. Мы предположили, что при конденсации пара на саже и в последующем образовании кластеров из сажи принимают участие капиллярные процессы, а силы поверхностного натяжения и внутрикапиллярного давления в свою очередь влияют на свойства кластеров. Этот механизм может объяснить наблюдаемое механическое поведение агрегатов во влажной среде (см. сообщение: *Turco R., Hamill P., Toon O.* *Capillary nucleation of soot* // *Third Intern. Conference on Carbonaceous Particles*.— Berkley, CA, 1987. October 5—8).
87. *Appleby L., Colbeck I., Hardman E., Harrison R. M.* Report on research activities at University of Essex to examine «smoke» optical properties and morphology // Paper MO.10.88, SCOPE—ENUWAR Moscow Workshop, 1988. March 21—25.
88. *Mulholland G. W., Bryner N. P., Ives L. K., Rogers C. P., Hudson J. G., Hallett J.* Effect of cloud-processing on the optical properties of smoke // *Nature*. 1988 (принято в печать).
89. *Clarke A. D., Charlson R. J.* // *Science*. 1985. V. 229. P. 263.  
*Clarke A. D., Noone K. J., Heintzenberg J., Warren S. G., Covert D. S.* // *Atoms. Env.* 1987. V. 21. P. 370.  
См. также: *Appl. Opt.* 1982. V. 21. P. 370.
90. *Ackerman T. P., Toon O. B.* // *Ibidem*. 1981. V. 20. P. 3661.
- [91] *Pueschel R. F., Livingston J. M., Russell P. B., Colburn D. A., Ackerman T. P., Alien D. A., Zak B.D., Einfeld W.* // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 8388.  
Пока еще нет измерений на длинах волн, превышающих 1 мкм, но такие данные необходимы для законченного описания оптических свойств дыма при расчетах энергетического баланса. Более того, пока нет независимых измерений спектра поглощения дыма, хотя ввиду малости альбеда однократного рассеяния предполагается, что он похож на спектр экстинкции.
92. Это происходит отчасти благодаря тому, что как рассеяние, так и поглощение зависит от длины волны  $\lambda$ . В рэлеевском пределе (т. е. для частиц с размером  $\ll \lambda$ ) поглощение изменяется как  $\lambda^{-1}$ , а рассеяние — как  $\lambda^{-4}$ . В этом пределе поглощение на длине волны 500 нм превышает поглощение на длине волны 10 мкм в 20 раз. Поглощение волн видимого и инфракрасного диапазонов сажевыми агрегатами с различной морфологией, очевидно, следует закону Рэлея (см. [83]).
93. *Roessler D. M., Faxvog F. R.* // *J. Opt. Soc. Am.* 1980. V. 70. P. 230.
94. *Bruce C. W., Richardson N. M.* // *Appl. Opt.* 1983. V. 22. P. 1051.
95. Данные для других видов дыма в общем согласуются с этим выводом. Например, в работе: *Uthe E. E., Morley B. M., Nielsen N. B.* // *Appl. Opt.* 1982. V. 21. P. 460, был исследован густой дым факела лесного пожара при помощи лидарного метода на длинах волн 630 и 1060 нм и было получено изменение отношения показателей экстинкции от 3 до 5 (при отношении длин волн  $\sim 2$ ), указывающее на то, что зависимость показателя экстинкции от длины волны более сильная, чем  $\lambda^{-1}$ .  
В работе: *O'Sullivan E. F., Ghosh B. K.* // *Combustion Institute European Symposium* / Ed. F. J. Weinberg — New York: Academic Press, 1973.—P. 195, получены аналогичные результаты на длинах волн 500 и 2200 нм. Эванс (*Evans W. J.* 1986.— частное сообщение) провел фотометрические исследования прохождения солнечного излучения через дымовой факел большого контролируемого лесного пожара для длин волн 600 и 10 мкм и получил отношение показателей экстинкции порядка 10.

96. Отношение коэффициентов поглощения дыма видимого и инфракрасного диапазонов длин волн зависит от состава, размера и морфологии частиц дыма. Это отношение для капелек масел быстро уменьшается при превышении радиуса капли нескольких десятков микрон и достигает значения  $\sim 1$  для больших капель. Чувствительность этого отношения к размеру частиц оказывается значительно меньшей для сажевых агрегатов, чем для (сферических) капелек масел.
97. *Anikin P. P., Shukurov A. K.* // *Izvestia — Atmos. Ocean. Phys.* 1988. V. 24 P. 247.  
*Sokolik I. N.* // *Ibidem.* P. 274.
98. *Ferek R. J., Lazrus A. L., Winchester J. W.* // *Atmos. Env.* 1983. V. 17. P. 1545. В данной работе собраны и проанализированы данные по старению частиц атмосферной сажи. Было замечено, что поверхность сажевых агрегатов, имеющих пушистую форму, часто смешивалась с сульфатными аэрозолями. Сажевые частицы обычно сохраняли открытую морфологию даже будучи и внутренне перемешанными.
99. Влияние коагуляции на оптические свойства дыма было детально исследовано в работах Р. Турко с соавторами [2] при использовании многокомпонентной с разрешением по размерам аэрозольной модели, которая учитывала как горизонтальную, так и вертикальную дисперсию. Однако в этой модели (как и в некоторых других опубликованных недавно) при рассмотрении эволюции физических и оптических свойств среды частицы предполагались «эквивалентно сферическими» (т. е. дым представлял собой капельки, наполненные сажей). При этом Турко с соавторами показал, что поглощение дыма может уменьшиться приблизительно в 2 раза за месяц (с уменьшением, наиболее часто имеющим место в течение первой недели) при разумных предположениях о скорости рассеяния дыма. Однако при аппроксимации сферическими частицами сильно недооцениваются излучательно-поглощательные свойства сажевой компоненты и действительное уменьшение может составлять  $\sim 20\text{--}30\%$ , т. е. это эффект второго порядка. В следующих работах: *Penner J.* // *Nature.* 1986. V. 324. P. 222; *Penner J., Porph W.* // *Atmos. Env.* 1987. V. 21. P. 957, была также принята для удобства аппроксимация сферическими частицами для расчета среднего коэффициента поглощения «старого» дыма, который оказался равным  $1,8 \text{ м}^2/\text{г}$ . Для сажи это значение занижено по крайней мере в 2 раза, а наиболее вероятно — в 3—5 раз.
100. *Chuan R. L.* // *Opt. Soc. of Amer. Meeting on Effects of Aerosols.* — Williamsburg, VA, 1976. December 13—15; частное сообщение, 1986; в этих работах исследованы физические свойства дыма, которые приводят к такому эффекту, когда свет от автомобильных фар кажется голубым. Были определены: средний массовый радиус частиц  $\sim 0,4 \text{ мкм}$ , логарифмически-нормальная дисперсия  $\sim 1,4$ , низкая поглощательная способность. Эти данные удовлетворяют основным условиям появления эффекта «голубой луны», согласно которым среднее значение радиуса частиц находится в диапазоне от  $0,4$  до  $0,9 \text{ мкм}$ , дисперсия  $< 1,5$  и значение мнимой части индекса рефракции  $< 0,01$  (см. работу: *Porch W. M., Ensor D. S., Charlson R. J., Heintzenberg J.* // *Appl. Opt.* 1973. V. 12. P. 34; в этой работе густой дым создавался при медленном горении и измерения проводились вдоль относительно коротких оптических путей).  
Вслед за лесными пожарами 1950 г. в провинции Альберта, в Канаде, в некоторых местах появлялись голубые луны и солнца, хотя появление «красных солнц» было более частым (см. работу: *Wexler H.* // *Weatherwise.* 1950. V. 3. P. 129).  
Так, запись солнечного спектра указывала на наличие относительно монодисперсных сферических частиц радиусом  $\sim 0,7 \text{ мкм}$  над поверхностью Шотландии (см. работу: *Wilson R.* // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1951; частное сообщение: *Patterson E. M.*, 1986).  
Следует отметить, что мнимая часть индекса рефракции дыма от горящей растительности обычно  $\geq 0,05$  [39]. Более того, процесс коагуляции, происходящий с разной скоростью в зависимости от изменяющейся концентрации частиц дыма, и вдоль сильных градиентов концентрации приводит к дисперсии среднего размера, превышающей значение 1,5 вдоль протяженного пути наблюдения. Уэкслер (см. ссылку выше) также отмечал, что в Вашингтоне, где наблюдалось появление голубых с красным отливом солнц, солнечное излучение, близкое к инфракрасному диапазону, подвергалось меньшему поглощению, чем излучение видимого диапазона, которое не находится в полной зависимости от наличия крупных частиц. Альтернативное объяснение наблюдения эффекта «голубых лун» в некоторых местах может быть дано на основе механизма конденсации водяного пара на субмикронных частицах дыма, в областях, где происходит адиабата-

- ческое охлаждение и рассеяние верхних воздушных слоев. Известно, что процессы конденсации производят частицы в очень узком диапазоне размеров, и поэтому сильные оптические эффекты возникают в перламутровых облаках или в облаках, возникающих при вулканических извержениях; известно также, что конденсированная вода также не поглощает в видимой части спектра.
- [101] *Deitz V. R., Bitner J. L.* // Carbon. 1972. V. 10. P. 145; 1973.. V. 11. P. 393.  
*Ellis W. D., Tometz P. V.* // Atmos. Env. 1972. V. 6. P. 707.  
*Puri B. P., Arora V. M.* // Indian J. Chem. Ser A. 1978. V. 16. P. 471.  
*Paplrer E., Bonnet B., Schultz A.* // Carbon. 1967. V. 5. P. 113.  
 Элементарный углерод также взаимодействует с OH (см.: *Mulcahy M. F. R., Young B. C.* // Carbon. 1975. V. 13. P. 115), с O (см.: *Wright F. J.* // Fifteenth Symposium on Combustion.— The Combustion Institute, 1974. P. 1449) и с NO<sub>2</sub> (см.: *Akhter M. S., Chughtai A. R., Smith D. M.* // J. Phys. Chem. 1984.. V. 88. P. 5334); см. также ссылки в [103].
102. *Silver D. M., de Haas N., Fristrom R.M., Livensky M. J.* // Symposium on Transport of Dust and Soot.— Kiel. Germany, 1986. August 27.  
 В эксперименте использовались высокие концентрации озона и измерялось изменение экстинкции света за короткий временной период ~1 ч; скорость распада затем экстраполировалась к атмосферным условиям.
103. а) *Stephens S. L., Caluert J. G., Birks J. W.* // Aerosol Sci. and Tech. 1989. V. 10. P. 326.  
*Stephens S. L., Rossi M. J., Golden D. M.* // Int. J. Chem. Kinet. 1986., V. 18. P. 1133.  
 б) *Glatzraier G., Malone R.* // SCOPE — ENUWAR Moscow Workshop. 1988. March 21—25.— В этой работе использовалась зависящая от температуры константа скорости реакции между сажей и озоном, полученная в работе Стефенса с соавторами. Был проведен расчет по трехмерной модели для переноса сажи и озона. Оцененное среднее время жизни сажи относительно разрушения озоном составило 30 лет, при этом только около 0,02% сажи разрушилось при взаимодействии с озоном в течение первых двадцати дней после инъекции (см. [162]).
- [104. Например, в работе: *Chuan R. L., Woods D. C.* // Geophys. Res. Lett. 1984. V. 11. P. 553, собраны данные по сажеобразным углеродным аэрозолям в стратосфере, где высоки концентрации озона, а время присутствия субмикрометрических частиц составляет год и более, см. также работу: *Rosen H., Novakov T., Bodhaine B. A.* // Atmos. Env. 1981. V. 15. P. 1371.  
 Сажевые отложения на поверхности зданий в загрязненных промышленных городах сохранялись даже при частом воздействии высоких концентраций озона в течение десятилетий после прекращения сажевых эмиссий.  
*Patterson E. M.* // DNA Global Effects Meeting.— NASA Ames Research Center, 1986. February 25—27.— В этой работе сажа была подвержена действию интенсивного ультрафиолетового излучения и никаких изменений в ее поглощательной способности не было обнаружено.
105. *Ogren J. A.* // Particulate Carbon: Atmospheric Life Cycle / Eds. T. Wolff, R. L. Klimisch.— New York: Plenum, 1982.— P. 379.  
*Ogren J. A., Grobliki P. J., Charlson R. J.* // Sci. Total. Env. 1984. V. 36. P. 329.  
 Выражение для смыва определяется как отношение концентрации вещества (т. е. сажи) в дождевой воде (г/м<sup>3</sup>) к его концентрации в окружающей воздушной массе (г/м<sup>3</sup>). Время жизни фоновой сажи относительно смысла по оценкам находится между 2 днями и 1 месяцем в зависимости от метеорологических условий; см. работу: *Ogren J. A., Charlson R. J.* // Tellus. Ser. B. 1983. V. 35. P. 241.
106. *Barrie L. A.* // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 5789.
107. *Heintz-iiberg J.* // Atmos. Env. 1982. V. 16. P. 2461.
108. *Patterson E. M.* // DNA Global Effects Meeting.— NASA Ames Research Center, 1986. February 25—27.  
 В этой работе представлены данные новых измерений приведенных соотношений для смыва сажи: в частности, найдено соотношение для смыва элементарного углерода, которое оказалось порядка  $5 \cdot 10^4$  (величина, предполагаемая для малых гидрофобных частиц) и порядка  $(2-12) \cdot 10^5$  для сульфатов (величина, предполагаемая для гидрокопических веществ).
109. *Golding B. W., Goldsmith P., Machin N. A., Slingo A.* // Nature. 1986. V. 319. P. 301.  
 В работе вычислены локальные, индуцированные солнечным излучением скорости конвекции, которые оказались величиной ~20 см/с (0,72 км/ч).
110. *Westphal D. L., Toon O. B., McKie W. R.* A case study of the radiative and dynamical effects of forest fire smoke plumes // SCOPE — ENUWAR Moscow Workshop, 1988. March 21—25.

- Westphal D. L., Toon O. B., Carlson T. N.* A case study of mobilization and transport of Saharan dust // *J. Atmos. Sci.* 1988 (в печати).
- [111] а) *Giorgi F.* // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. P. 1127.  
 б) *Giorgi F., Visconti G.* // *Ibidem.* P. 1145.
112. *Cotton W.* Mesoscale / regional scale simulations of multiple firestorms // DNA Global Effects Meeting.— Santa Barbara, CA, 1988. April 19—21.
113. *Radke L. F., Lyons J. H., Ackermann A. S., Hegg D. A., Hobbs P. V., Weiss R. E.* A semi-Lagrangian experiment quantifying the aging of smoke in the atmosphere over two days // DNA Global Effects meeting.— Santa Barbara, CA, 1988. April 19—21.
114. *Robock A.* Surface temperature effects on forest fire smoke plumes // *Aerosols and Climate* / Eds. P. V. Hobbs, M. P. McCormick.— Hampton: Deepak Publ., 1988; China, California conflagrations cause cooling // Paper MO. 23.88.—SCOPE — ENUWAR Moscow Workshop, 1988. March 21—25; // *Science.* 1988. V. 242. P. 911.
115. Эффективное мезомасштабное рассеяние облаков в виде частиц хорошо видно на изображениях лесных пожаров, полученных со спутников (см. работы: *Matson M., Schneider S. R., Aldridge B., Satchwell B.* // NOAA Tech. Report NESDIS-7.— U. S. Dept. Commerce, 1984.  
*Chung Y. S.* // *Atmos. Env.* 1986. V. 20. P. 617.  
*Fraser R. S., Kaujman Y. J., Mahoney R. L.* // *Ibidem.* 1984. V. 18. P. 2577).  
 Нелетучие аэрозоли часто, объединяясь, образуют за несколько дней толстые однородные облака региональных размеров.
116. *Veltishchev N. N., Ginsburg A. S., Golitsyn G. S.* // *Izvestia — Atmos. Ocean Phys.* 1988. V. 24. P. 296.
117. *Wexler H.* // *Weatherwise.* 1950. V. 3. P. 129.  
 В работе отмечалось, что облака дыма от лесных пожаров в провинции Альберта (Канада) в 1950 г. приводили к понижению температуры в Вашингтоне на 4—6 °C.
118. а) *Ramaswamy V., Kiehl J. T.* // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. P. 55S7.  
 б) Другие авторы сделали аналогичные расчеты излучательного энергетического баланса; см. например: *Golitsyn G. S., Ginsburg A. S.* // *Tellus. Ser. B.* 1985. V. 37 P. 173.
119. *Голицын Г. С., Шукуров А. К.* // *ДАН СССР.* 1987. Т. 297. С. 1334. Анализ данных по 50 пыльным бурям в Таджикистане (СССР) показал, что дневные температуры поверхности опускались на 10—12 °C. Интересно отметить, что заметное уменьшение урожаев коррелировало со случаями пылевых бурь.
120. Проблема пыли впервые была поставлена и количественно проанализирована в работе [2] и обсуждалась в [3, 4]. Хотя пыль почвенного происхождения имеет низкий коэффициент поглощения ( $\sim 0,1 \text{ м}^2/\text{г}$ ), ее рассеивающие свойства могут оказаться важными в сценариях, основанных на атаках по целям «противодействующих сторон».
- [121] Подъем дыма регионального масштаба мог иметь место в лесных пожарах в провинции Альберта в 1950 г., при этом он поднялся от середины тропосферы до уровня тропопаузы за несколько дней (*Wexler H.* // *Weatherwise.* 1950. V. 3. P. 129). Радке (*Radke L.*, 1988, частное сообщение) сообщает, что во время недавних полевых экспериментов около города Панама-Сити (шт. Флорида) сажевое облако керосинового происхождения поднялось выше приземного слоя атмосферы; там у него положение стабилизировалось, вероятно, в результате солнечного нагрева.
122. *Haberle R. M., Ackerman T. P., Toon O. B., Hollingsworth J. L.* // *Geophys. Res. Lett.* 1985. V. 12. P. 405.  
 В данной работе на основе двумерной усредненной по зонам глобальной циркуляционной модели предсказано возникновение значительной конвекции больших географических масштабов, индуцированной солнечным излучением.
123. Если предположить, что каждый из параметров из табл. II распределен равномерно в диапазоне своего изменения, то результат (в данном случае оптическая толщина) представляет собой распределение «нормального» вида с максимальной вероятностью около центра диапазона изменения. Если каждый из параметров нормально распределен по диапазону изменения, то результат (оптическая толщина) будет нормально распределен, но с меньшей дисперсией, чем в предыдущем случае. (По этому поводу см.: *Kirkwood J., Sanborn J., Turco R.* Contribution of model parameter uncertainties to uncertainties in the TTAPS analysis of Nuclear Winter // Report 130000-5.— Los Angeles.: R & D Associates, 1984.—40 p.)
124. Средний коэффициент ослабления солнечного излучения (без учета влияния рассеяния) может быть оценен, как  $\exp(-\mu\tau_a)$ , где  $\mu \approx \sqrt{3}$  множитель, учитывающий среднее значение зенитного угла.



125. По оценкам Национального исследовательского Совета [3], мало поглощающий дым, происходящий из растительности, составляет 30 Тг, в то время как, по оценкам Смолла и Буша [21], он составляет 3 Тг. Анализ Акермана с соавторами [22] приводит к выводу о том, что 750 Тг растительности может оказаться подверженным воздействию при ядерных ударах не по городским целям, которое приведет к потенциально возможной эмиссии дыма до 23 Тг. Недавно Смолл с соавторами [25] показал, что  $5 \cdot 10^5$  км<sup>2</sup> растительности может быть подвержено действию теплового излучения ядерного взрыва при полномасштабном ядерном обмене ударами, что аналогично горению лесов и кустарников, рассмотренному Турко с соавторами [2], и которое дает до 80 Тг дыма. Фракция сажи в дыме растительной природы может сильно меняться и достигать 10–15% [39]. Соответственно растительность представляет собой источник с очень неопределенными возможностями, хотя, возможно, и вторичный по важности.
126. Три сценария SCOPE относятся к оптическим толщинам 0,3; 1,0 и 3,0 соответственно, и в каждом случае получен единственный в своем роде профиль. Оптические свойства дыма, время года при инъекции и другие параметры также точно определены [9].
127. Непрозрачность дыма для волн инфракрасного диапазона (впервые рассмотренная Турко с соавторами [2]) приводит к двум важным эффектам. Дым может поглощать и захватывать поднимающееся от поверхности тепло в атмосферном окне прозрачности (участке спектра от 8 до 13 мкм). Дым может также увеличить эмиссионную способность верхних слоев атмосферы, нагретых солнечным излучением и поэтому испускающих большое количество тепловой энергии на Землю (которое отчасти компенсирует эффективное охлаждение, возникающее за счет эмиссии тепла нагретой атмосферы в пространство). Подробное обсуждение вопросов, связанных с переносом энергии инфракрасного излучения и энергетического баланса поверхности, можно найти в [4, 118, 128].
128. Cess R. D. // *Atmos. Env.* 1983. V. 12. P. 2555.  
Valero F. P. J., Ackerman T. P., Gore W. J. Y. // *Geophys. Res. Lett.* 1983. V. 10. P. 1184; 1984. V. 11. P. 465.  
MacCracken M. C., Cess R. D., Potter G. L. // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 14445.
129. Warren S. G., Wiscombe W. J. // *Nature.* 1985. V. 313. P. 467.  
Clarke A. D., Noone K. J. // *Atmos. Env.* 1985. V. 19. P. 2045.
130. Ledley T. S., Thompson S. L. // *Climatic Change.* 1986. V. 8. P. 155.
- [131] Vogelmann A. M., Robock A., Ellingson R. G. // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 5319.
132. Трехмерные глобальные модели климата, используемые для изучения ядерной зимы, становятся чрезвычайно сложными (основные черты моделей указаны в подписях к рис. 3). Тем не менее исследование микрофизики аэрозолей, процессов в облаках и радиационного переноса остается грубым по сравнению с тем, которое проводится в моделях меньшей пространственной размерности; с другой стороны, модели меньших размерностей могут только грубо описывать процессы крупномасштабного атмосферного переноса и выпадения осадков.
133. MacCracken M. C. Nuclear war: Preliminary estimates of the climatic effects of a nuclear exchange // Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-89770.— Livermore, CA, 1983.— P. 23.
134. Aleksandrov V. V., Stenchikov G. L. On the modelling of the climatic consequences of the nuclear war.— Препринт ВЦ АН СССР.— Москва, 1983.
135. Covey C., Schneider S. H., Thompson S. L. // *Nature.* 1984. V. 308. P. 21.
136. MacCracken M. C., Walton J. J. The effects of interactive transport and scavenging of smoke on the calculated temperature change resulting from large amounts of smoke // Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-91446.— Livermore, CA, 1984.— P. 20.
137. Robock A. // *Nature.* 1984. V. 310. P. 667.
138. Thompson S. L. // *Ibidem* 1985. V 317. P. 35.
139. Malone R. C., Auer L. H., Glatzmaier G. A., Wood M. C., Toon O. B. // a) *Science.* 1985. V. 230. P. 317; б) *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 1039.
140. Covey C., Thompsons. L., Schneider S. H. // *Ibidem.* 1985. V. 90. P. 5615.
- [141] Cess R. D., Potter G. L., Ghan S. J., Gates W. L. // *Ibidem.* P. 12937.
142. Stenchikov G. L., Carl P. Climatic consequences of nuclear war: Sensitivity against large — scale inhomogeneities in the initial atmospheric pollutions. Berlin, GDR: Central Inst. Electron Physics, 1985.—96 p.
143. Covey C. // *Bioscience.* 1985. V. 35. P. 563.
144. Vupputuri R. K. R. // *Atmos. Env.* 1986. V. 20. P. 665.
145. Covey C. // *Nature.* 1987. V. 325. P. 701.

146. *Thompson S. L., Ramaswamy V., Covey C.* // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. P. 10942
147. *Mitchell J. F. B., Slingo A.* // Ibidem. 1988. V. 93. P. 7037.
148. *Ghan S. J., MacCracken M. C., Walton J. J.* // Ibidem. P. 8315.  
Также существуют неопубликованные результаты расчетов сценариев инъекции SCOPE-ENUWAR (см. примечание в [126]).
149. *Glatzmaier G. A., Malone R. C.* Global climate simulations of the ENUWAR case studies//Paper MO.16.88.—SCOPE — ENUWAR Moscow Workshop, 1988. March 21—25.
150. *Stenchikov G., Carl P.* First acute phase stress matrix calculations using the CCAS tropospheric general circulation model// Paper MO.26.88.— SCOPE — ENUWAR Moscow Workshop, 1988. March 21—25.  
*Stenchikov G.* Climate consequences of nuclear war: The change of land surface properties and climate variations// Paper GE.06.87.— SCOPE — ENUWAR Geneva Workshop, 1987. November 16—20.
- [151] *Pittock A. B., Frederiksen J. S., Garratt J. R., Walsh K.* // Aerosols and Climate. / Eds. P. V. Hobbs, M. P. McCormick — Hampton, VA: Deepak Publ., 1988.— P. 395.
152. *Haberle R. M.* // Science. 1986. V. 234. P. 459.  
Марсианские пыльные бури предоставляют аналоги явлений нагрева аэрозолей, их подъема над поверхностью и ускоренного глобального рассеяния.
153. *Ackerman T. P., Turco R. P., Toon O. B.* // Aerosols and Climate / Eds. P. V. Hobbs, M. P. McCormick.— Hampton, VA: Deepak Publ., 1988.— P. 443.
154. Интерактивные климатические прогнозы с обратными связями включают в себя среди всего прочего учет морского льда, снежного покрова, альбеда от облаков и температуры поверхности моря. Существующие модельные параметризации для этих физических объектов не представляются надежными с точки зрения описания возмущенных состояний на больших временных отрезках.
155. *Pittock A. B., Walsh K., Frederiksen J. S.* General circulation model simulation of mild «nuclear winter» effects. // Austr. Meteorol. Mag. 1988 (принято в печать).  
*Pittock A. B.* Environmental impacts on Australia of a nuclear war. 1988 (рукопись).  
*Walsh K., Pittock A. B.* The sensitivity of a coupled atmospheric — oceanic model to variations in the albedo and absorptivity of a stratospheric aerosol layer // Paper MO.08.88.— SCOPE — ENUWAR Moscow Workshop, 1988. March 21—25.
156. *Lamb H. H.* // Phil. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A. 1970. V. 266. P. 425.  
*Landsberg H. E., Albert J. M.* // Weatherwise. 1974. V. 27. P. 63.  
*LaMarche V. C., Jr., Hirschboeck K. K.* // Ibidem. V. 307. P. 121.  
*Kelly P. M., Sear C. B.* // Ibidem. V. 311. P. 740.  
*Stothers R. B.* // Science. 1984. V. 224. P. 1191.
157. *Pollack J. B., Toon O. B., Sagan C., Summers A., Baldwin B., Van Camp W.* // J. Geophys. Res. 1976. V. 81. P. 1071; Nature. 1976. V. 263. P. 551.
158. *Robock A.* // Science. 1981. V. 212. P. 1383,  
*Robock A., Mass C.* // Ibidem. 1982. V. 216. P. 628.  
*Robock A.* // Geof. Int. Volcan. 1984. V. 23. P. 403; J. Volcan. Geotherm. Res. 1981. V. 11. P. 67.
159. *Hansen J. E., Wang W.-C., Lads A. A.* // Science. 1978. V. 199. P. 1065.  
*Self S., Rampino M. R.* // Trans. Am. Geophys. Union. EOS. February 9, 1988.— P. 74.  
*Handler P.* // Geophys. Res. Lett. 1984. V. 11. P. 1121.  
*Angell J. K.* // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P. 3697.
160. *Alvarez L. W., Alvarez W., Asaro F., Michel H. V.* // Science. 1980. V. 208. P. 1095.  
*Pollack J. B., Toon O. B., Ackerman T. P., McKay C. P., Turco R. P.* // Science. 1983. V. 219. P. 287.  
*Toon O. B., Pollack J. B., Ackerman T. P., Turco R. P., McKay C. P., Lin M. S.* // Geological Soc. of Am. Spec. Paper 190 / Eds. L. T. Silver, P. H. Schultz.— 1982.— P. 187.
- [161] *Wolbach W. S., Lewie R. S., Anders E.* // Science. 1985. V. 230. P. 167.  
Согласно анализу этой работы полная масса углеродных частиц, находящихся в К — Т-слое глины, порядка  $10^5$  Тг. Было определено, что около 80% углерода в виде частиц морфологически сходны с сажой, появляющейся при горении. Однако возможный источник такого огромного количества сажи не установлен.
162. *Kao C.-Y. J., Glatzmaier G. A., Malone R. C., Turco R. P.* Global three-dimensional simulation of ozone depletion under post — war conditions // J. Geophys. Res. 1989 (принято в печать).  
*Malone R. C., Glatzmaier G. A.* // SCOPE — ENUWAR Moscow Workshop, 1988.— March 21—25.

*Thompson S., Crutzen P.* // DNA Global Effects Meeting,— Santa Barbara, CA, 1988. April 19—21.

Обе группы обсуждали предварительные результаты расчетов по трехмерным моделям по переносу озона и фотохимическим процессам в атмосфере, возмущенной во время ядерной зимы. Более ранние исследования рассматривали влияние на озон химических процессов с участием  $\text{NO}_x$  и процессов нагрева дыма (см. [144]), но не было рассмотрено перераспределение озона в результате аномальных крупномасштабных динамических процессов.

163. National Research Council. Causes and Effects of Changes in Stratospheric Ozone: Update 1983.— Washington, DC: National Academy Press, 1984.  
Проблемы, связанные с ультрафиолетовым излучением, обсуждаются в серии сообщений Национального исследовательского совета. К последствиям действия на человека УФ-В излучения относятся увеличение заболеваемости раком кожи и ослабление иммунной системы. Фитопланктон — основа морской цепочки питания,— как и важные для сельского хозяйства микробы в экосистемах Земли, также очень чувствительны к излучению.
164. Мы относимся к этим неопределенностям сценариев как к «неустранимым». Не-четко известные факторы включают: обстоятельства, которые могут провоцировать применение ядерного оружия; процесс эскалации; полное количество использованного ядерного оружия; специфические цели, высоты и выходы продуктов горения; тактико-технические данные по вооружениям; вероятность поджига и расположение целей и детали метеорологических процессов в момент противодействия. Тем не менее при существующих и развивающихся ядерных силах [23] очень возможно развитие последовательности событий, приводящих к ядерному конфликту [4]; вероятность крупных эмиссий дыма при этих обстоятельствах высока [24, 25].
165. *Turco R. P.* Synthesis of fallout hazards in a nuclear war. // Paper MO.22.88.— SCOPE — ENUWAR Moscow Workshop, 1988. March 21—25.— P. 15.
166. *Birks J. W.* //SCOPE — ENUWAR Moscow Workshop, 1988. March 21—25.  
*Birks J. W., Stephens S. L.* // The Medical Implications of Nuclear War / Eds. F. Solomon, R. Q. Marston — National Academy Press. 1986.— P. 155.  
*Stephens S. L., Birks J. W.* // Bioscience. 1985. V. 35. P. 557.
167. World Health Organization «Effects of Nuclear War on Health and Health Services». — Geneva, 1988.  
The Medical Implications of Nuclear War/ Eds. F. Solomon, R. Q. Marston.— National Academy Press, 1986.
168. *Hegg D. A., Radke L. F., Hobbs P. V., Brock C. A., Riggan P. J.* // J. Geophys. Res. 1988. V. 92. P. 14701.