

УДК 551.588.9

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ «ЯДЕРНОЙ ЗИМЫ» В РАБОТАХ Г.С. ГОЛИЦЫНА И ЕГО КОЛЛЕГ В 80-е ГОДЫ XX ВЕКА

© 2025 г. А. С. Гинзбург

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, стр. 1, Москва, 119017 Россия

e-mail: gin@ifaran.ru

Поступила в редакцию 27.08.2024 г.

После доработки 07.10.2024 г.

Принята к публикации 15.11.2024 г.

В статье представлена авторская версия истории исследований гипотезы «ядерной зимы» — катастрофического изменения климата Земли в случае крупномасштабного использования ядерного оружия и ключевой роли академика Г.С. Голицына в этих исследованиях. Особое внимание уделено предыстории возникновения гипотезы «ядерной зимы» и научному прорыву 80-х гг. XX в., когда ученые СССР, США и других стран на многих научных встречах и во множестве научных и популярных публикаций старались осмыслить теоретическую возможность резкого похолодания на большей части земной суши в результате массовых пожаров ядерной войны и найти природные аналоги такой «рукотворной» климатической катастрофы.

Ключевые слова: ядерное оружие, дым пожаров ядерной войны, «ядерная зима», климатические модели, природные аналоги

DOI: 10.31857/S0002351525010034, **EDN:** HFEFSW

ВВЕДЕНИЕ

Автор данной статьи более четырех десятилетий вовлечен в исследование и обсуждение возможных климатических последствий потенциального крупномасштабного ядерного конфликта в тесном сотрудничестве с академиком Георгием Сергеевичем Голицыным.

Вот как описал научный прорыв 80-х гг. прошлого века академик Г.С. Голицын в интервью, данному известному журналисту и популяризатору науки В.С. Губареву четверть века назад [Губарев, 2001]. «Можно ли сказать так: работа над проблемами «ядерной зимы» заставила Вас более внимательно отнестись к изменениям климата на Земле?» — поинтересовался В.С. Губарев. «Пожалуй, это как на войне: если есть успех на каком-то направлении, то хочется его развивать, теория «ядерной зимы» — это определенный прорыв в нашей области науки», — ответил Г.С. Голицын [Губарев, 2001].

В последующие десятилетия было несколько волн активизации исследований гипотезы «ядерной зимы», которые в начале XXI в. были посвя-

щены преимущественно потенциальным последствиям региональных ядерных конфликтов. Современная ситуация в мире снова вызывает тревогу и требует вспомнить о катастрофических последствиях даже региональных ядерных конфликтов. Данная статья посвящена предыстории возникновения гипотезы «ядерной зимы» и первому «взрывному» этапу (80-е годы XX в.) исследований этой и по сей день очень актуальной темы.

Автору посчастливилось в той или иной мере сотрудничать и общаться со многими замечательными российскими (советскими) и иностранными учеными, принимавшими участие в постановке и разработке проблемы «ядерной зимы», такими как Нобелевский лауреат Пауль Крутцен и лауреат Нобелевской премии мира, участник Манхетенского проекта сэр Джозеф Ротблат, известный астроном и популяризатор науки Карл Саган, академики Александр Обухов, Никита Моисеев, Евгений Велихов, Георгий Голицын, Михаил Будыко, Юрий Израэль, Игорь Петрянов-Соколов, Кирилл Кондратьев, Андрей Кокошин, а также Владимир Александров, Георгий Стенчиков, Юрий Свирижев, Ричард Турко,

Оуэн Брайен Тун, Майкл МакКракен, Алан Робок, Джойс Пеннер, Петер Карл и многие другие. Возможно, автор кого-то не упомянул, но это никак не умаляет роль этих ученых в исследовании «ядерной зимы».

Огромное значение для автора имело и по сей день имеет сотрудничество со своим замечательным старшим научным коллегой Г.С. Голицыным, вылившееся в целый ряд совместных исследований и публикаций по теме «ядерной зимы». Очень важно для автора было услышать, как Георгий Сергеевич, поздравляя в 2024 г. автора с восьмидесятилетием, сказал: «Я хочу вспомнить его статью в Докладах АН СССР 1973 г. о радиационном теплообмене между атмосферой и подстилающей поверхностью, которая описывала температурный режим на Марсе во время его глобальных бурь, она послужила основой описания «ядерной зимы»». Георгий Сергеевич активно содействовал публикации этой статьи, обратившись к академику Г.И. Петрову (тогда директору ИКИ АН СССР) с просьбой представить эту статью в Доклады АН СССР [Гинзбург, 1973]. Два десятилетия спустя (в 1991 г.) автор данной статьи защитил в Институте космических исследований докторскую диссертацию «Радиационная энергетика планетных атмосфер» по уникальной и очень красиво сформулированной специальности «Гелиофизика и физика Солнечной системы».

Автор попытался представить основные вехи истории исследований атмосферных и климатических эффектов применения ядерного оружия как в глобальном, так и региональном масштабе и по возможности полно описать роль Г.С. Голицына в этих исследованиях. В статье использованы самые разнообразные источники информации — от статей, монографий и сборников трудов до препринтов и отчетов, накопившиеся у автора за четыре десятилетия, а также недавно появившихся в открытом доступе служебных документов США 80-х гг. XX в. на данную тему. Важными источниками информации также являются многочисленные сайты, среди которых надо выделить сайт университета Рутгерс (США) [<http://climate.envsci.rutgers.edu/nuclear>] и очень подробную и отражающую различные взгляды на проблему «ядерной зимы» интернет-публикацию [https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_winter].

Результаты некоторых исследований конца прошлого и начала нынешнего века опубли-

кованы в малодоступных и/или узкоспециализированных изданиях, либо вообще не были полностью опубликованы. Поэтому автор счел возможным описать некоторые из них достаточно подробно.

В статье использованы материалы из брошюры автора «Планета Земля в «послеядерную» эпоху» [Гинзбург, 1988], обобщающей в популярной форме выполненные к этому времени исследования. Она вышла в серии «Международный мир и разоружение» сразу на нескольких языках (русском, английском, немецком и испанском). Через двадцать лет автор с интересом обнаружил в интернете на научно-популярном сайте [<http://thisworld.su>] опубликованное в 2009 г. основное содержание этой брошюры с примечанием: при создании сайта были использованы материалы из [Гинзбург, 1988]. Сейчас этот сайт, судя по всему, не функционирует, но данные файлы можно найти на другом сайте [<http://bluesbag7.narod.ru>].

В нынешней геополитической ситуации, ученые и широкая мировая общественность снова активизировали обсуждение опасности возникновения ядерного конфликта не только с военной точки зрения, но и с пониманием того, что использование ядерного оружия приводит не только к огромным разрушениям и массовым человеческим жертвам, но и к катастрофическим экологическим и климатическим последствиям (см., например, [Ginzburg and Samoylovskaya, 2024]).

В рамках одной статьи невозможно достаточно полно описать более чем сорокалетнюю историю исследования различных аспектов возможных атмосферных и климатических последствий применения ядерного оружия в случае глобального или регионального ядерного конфликта. На эту тему опубликованы многие сотни, даже тысячи, научных отчетов, статей, сборников и монографий. Так, например, список литературы в монографии [SCOPE, 1989], в некотором смысле подводящей итоги исследований 80-х гг. XX в., содержит более четырехсот наименований. Во время работы над данной статьей автор обнаружил множество не упомянутых в [SCOPE, 1989] публикаций того времени, а также недавно открытых отчетов (преимущественно американских) прошлого века. Список литературы к данной статье содержит только часть публикаций 80-х гг. XX в. и всего несколько современных статей и обзоров. Исто-

рия и предыстория исследований феномена «ядерной зимы» еще далека от полного осмысления и описания.

*Начало 80-х годов XX века —
прорыв в атмосферных исследованиях*

В декабре 2023 г. исполнилось сорок лет со дня публикации статьи R. Turco, B. Toon, T. Ackerman, Pollack, C. Sagan «Nuclear Winter: Global Consequences of Multiple Nuclear Explosions» [TTAPS, 1983a] в журнале Science, где впервые в научной литературе используется термин «ядерная зима». Примечательно, что первоначально рукопись этой статьи имела название «Global Atmospheric Consequences of a Nuclear War», а термин «Nuclear Winter» появился только в процессе публикации. Эта работа дала старт настоящему прорыву в исследовании возможных климатических последствий ядерной войны в 80-х гг. XX в.

По существу, эти исследования начали активно развиваться после выхода в свет в 1982 г. специального сдвоенного выпуска шведского журнала AMBIO под броским заголовком «Nuclear War: The Aftermath» (Ядерная война: последствия). Особое внимание ученых во всем мире привлекла опубликованная в этом выпуске статья П.Й. Крутцена и Дж. Биркса «The Atmosphere after a Nuclear War: Twilight at Noon» (Атмосфера после ядерной войны: сумерки в полдень) [Crutzen and Birks, 1982].

Очень важно отметить, что несмотря на отсутствие в те годы «всемирной паутины» интернета, научные связи между учеными разных стран были развиты настолько, что уже в конце 1982 — начале 1983 гг. сотрудники советских профильных академических и ведомственных институтов получили возможность ознакомиться с опубликованными и находящимися в печати работами зарубежных коллег, что позволило ученым Института физики атмосферы и Вычислительного центра АН СССР достаточно быстро получить аналитические и модельные оценки климатических последствий возможного ядерного конфликта и описать некоторые природные аналоги этих последствий.

Первые результаты были доложены на прошедшей в Москве в мае 1983 г. «Всесоюзной конференции ученых за избавление человечества от угрозы ядерной войны, за разоружение и мир»

[Вестник АН СССР, 1983] и более развернуто — на конференции «Мир после ядерной войны», состоявшейся в Вашингтоне в октябре — ноябре того же года [Sagan et al., 1984]. Так началась история исследований гипотезы «ядерной зимы», которые продолжаются и поныне.

Важно понимать, что ядерный конфликт отличается от всех известных нам войн и природных бедствий огромными и труднопредсказуемыми вторичными долговременными воздействиями, губительными для тех, кто выживет непосредственно после ядерных взрывов. И по сей день понятны далеко не все возможные последствия ядерной войны для человечества и окружающей среды, но совершенно ясно, что уже достоверно известные эффекты не оставляют иллюзий на благополучное «послевоенное» будущее даже для отдаленных от «театра военных действий» регионов Земли.

В истории Земли и всей Солнечной системы, очевидно, не было таких глобальных катастроф, которые могли бы сравниться по своим последствиям с возможными тяжелейшими последствиями ядерной войны, представляющими совокупность дополняющих и усугубляющих друг друга эффектов.

Исследования естественных изменений климата и антропогенных воздействий на него вследствие развития мирового хозяйства показывают, что климатическая система Земли (океан, суша, атмосфера, льды, биосфера) эволюционирует сравнительно медленно: за время порядка многих десятилетий и даже веков. При изучении эволюции такой сложной многопараметрической системы (с множеством положительных и отрицательных обратных связей), следует рассматривать наиболее вероятные изменения окружающей среды и оптимальные пути развития мирового хозяйства в изменяющихся климатических условиях.

При изучении же возможных глобальных катастрофических явлений, каким является мировой ядерный конфликт, необходимо рассматривать все, даже кажущиеся маловероятными механизмы развития региональных и глобальных последствий. Перестройка режима атмосферы и других частей климатической системы Земли может в этом случае развиваться значительно быстрее, чем при естественных и «мирных» антропогенных изменениях.

Предыстория

Различные природные процессы можно сравнивать путем сопоставления их энергетики или же посредством изучения вызываемых ими последствий. Энергию ядерных взрывов измеряют обычно в единицах тротилового эквивалента: при взрыве заряда в 1 Мт выделяется энергия $4.2 \cdot 10^{15}$ Дж, равная тепловой энергии взрыва аналогичной массы (10^6 т) тринитротолуола (тротила).

При взрыве всех имеющихся арсеналов ядерного оружия (по состоянию на начало 80-х гг. прошлого века эти арсеналы оценивались приблизительно в 12 тыс. Мт) выделится энергия $0.5 \cdot 10^{20}$ Дж, равная энергии, получаемой Землей от Солнца примерно за пять мин. Если, наоборот, измерять солнечную энергию в мегатоннах, то можно сказать, что Солнце для Земли служит источником энергии мощностью примерно 40 Мт/с. Ядерный конфликт с использованием всех имевшихся тогда зарядов соответствует около 0.3% суточного поступления солнечной энергии.

Непосредственное выделение энергии при ядерных взрывах не вызывает существенных атмосферных эффектов. Так, если бы вся энергия ядерных взрывов пошла бы на разогрев земной атмосферы, то ее средняя температура поднялась бы всего на 0.01°C , хотя локальные разогревы могли бы быть значительными.

Энергия ядерных взрывов становится источником лесных и городских пожаров, которые, в свою очередь, выбрасывают в атмосферу огромное количество дыма (сажевого аэрозоля), сильно поглощающего солнечное излучение. Сами взрывы, как бы разрушительны они ни были, не в состоянии стать причиной кардинальной перестройки энергетики природных процессов, таких как формирование температурного режима и влагообмена, циркуляция атмосферы и океана. Катастрофическими для климата Земли оказываются вторичные эффекты ядерных взрывов и даже эффекты третьего порядка, главным из которых является экранирование солнечного излучения мощным слоем дыма от лесных и городских пожаров.

Прежде, чем кратко изложить основные идеи и результаты исследования феноменов «сумерек в полдень» и «ядерной зимы», надо напомнить некоторые работы предыдущих десятилетий, заложивших основу научного прорыва 80-х гг. XX в.

Прошло более 80 лет со времени первого испытания атомной бомбы, 80 лет с момента бомбардировок Хиросимы и Нагасаки в 1945 г. и более 70-ти лет со дня первого испытания термоядерного оружия в 1952 г. В течение этих десятилетий изучаются последствия использования ядерного оружия для человечества и окружающей среды. Но и сегодня никто из серьезных ученых не возьмется утверждать, что полностью ясна общая картина возможных климатических последствий ядерной войны.

Очень характерно в этом плане мнение сэра Джозефа Ротблата — одного из основателей Пагоушского движения ученых за мир, поставившего свою подпись под знаменитым манифестом Б. Рассела — А. Эйнштейна.

Выступая на конференции «Мир после ядерной войны», состоявшейся в Вашингтоне в октябре-ноябре 1983 г., он заявил: «Ученые регулярно сталкиваются с последствиями использования ядерного оружия, которые они не могут заранее предвидеть. В 1945 г., после Хиросимы и Нагасаки, обнаружилась лучевая болезнь у выживших жертв бомбардировок. На рубеже 50-х и 60-х гг. испытания в атмосфере показали существование электромагнитного импульса, нарушающего связь и повреждающего линии электропередач, электрические и электронные системы. В 1973 г. обратили внимание на возможность разрушения стратосферного озона окислами азота, образующимися при ядерных взрывах. В 1982 г. заметили, что дым от многочисленных пожаров в значительной степени преградит путь солнечным лучам к земной поверхности, где наступят мрак и холод. Последний эффект был открыт не профессионалами, занимающимися по долгу службы последствиями применения ядерного оружия, а геофизиками, взглянувшими на эту проблему со стороны. Я говорю это не в упрек профессионалам, а лишь потому, что подобный факт помогает понять, насколько и сейчас нельзя считать, что мы знаем все о последствиях использования этого оружия, и что нет еще чего-то очень серьезного, о чем мы пока и не подозреваем». И сегодня видение Дж. Ротблатом этой проблемы остается актуальным.

Вскоре после окончания Второй мировой войны началось такое стремительное накопление ядерного оружия и мощности ядерных зарядов,

а также развитие средств его доставки, что уже к началу 1960-х гг. стало ясно — полномасштабный обмен ядерными ударами между сверхдержавами — США и СССР — гарантированно приведет к взаимному уничтожению их экономики и инфраструктуры. Возник вопрос об оценке воздействия взрывов большой мощности на крупные города и промышленные центры, а также возможных глобальных долговременных последствий казавшейся в то время вполне реальной ядерной войны.

В 1960-е и 1970-е гг. многие политики и военные считали, что ядерная война отбросит мировую цивилизацию на десятки или даже сотни лет назад, но большая часть человечества переживет эту глобальную катастрофу и постепенно восстановит мировое хозяйство.

Как стало известно из рассекреченных в США документов послевоенного времени, уже вскоре после бомбардировок Хиросимы и Нагасаки начались исследования возможных последствий атомных взрывов на погоду и климат. В 2013 г. был опубликован отчет Агентства США по уменьшению военной угрозы, посвященный произведенному США 1 ноября 1952 г. на одном из островов атолла Эниветок (Eniwetok) в составе Маршалловых островов первому в мире испытанию термоядерного взрывного устройства Ivy Mike мощностью 10.4 Мт [Kunkle and Ristvet, 2013].

В этом отчете сказано, что незадолго до этого испытания были высказаны опасения, что **аэрозоль, поднятый в атмосферу таким взрывом, может охладить Землю** (выделено автором). Эти сообщения были высказаны майором ВВС США Норайром Лулежяном и астрономом Натараджаном Вишванатаном в секретном отчете «Влияние супероружия на климат планеты» [Lilejian, 1952a; Lilejian, 1952b], распространение которого строго контролировалось.

Несмотря на то, что это исследование указывало на отсутствие заметной вероятности изменения климата, вызванного отдельным взрывом, эксперты Агентства США по уменьшению военной угрозы (The Defense Threat Reduction Agency — DTRA) упоминают в недавно рассекреченных документах отчет 1952 г. как первоначальное исследование концепции «ядерной зимы».

В 1950 г. появилось первое издание доклада «Воздействия ядерного оружия» под редакцией

Сэмюэля Гласстоуна, который многократно переиздавался в США с дополнениями и уточнениями (см. [Glasstone and Dolan, 1977; Glasstone, 2020]). Уже в ранней версии этого доклада 1957 г., опубликованной после взрывов водородных бомб высокой мощности на тихоокеанских полигонах Айви-Майк в 1952 г. и Касл-Браво (15 Мт) в 1954 г., в разделе «Ядерное оружие и погода», говорится: «Известно, что пыль, поднятая при сильных извержениях вулканов, таких как Кракатау в 1883 г., вызывает заметное уменьшение солнечного света, достигающего поверхности Земли. Количество почвенных или других твердых частиц, остающихся в атмосфере после взрыва даже самого крупного ядерного заряда, вероятно, составляет не более одного процента от того, что было поднято при извержении Кракатау». Записи потоков солнечной радиации, приведенные в этом докладе, привели его авторов к заключению, что ни один из ядерных взрывов «на сегодняшний день» (1957 год! — выделено автором) не привел к каким-либо заметным изменениям в прямом солнечном свете, достигающем поверхности Земли.

С другой стороны, согласно публикации [Dörries and Matthias, 2011], уже в 1956 г. Бюро погоды США считало возможным, что достаточно крупная ядерная война с поверхностными взрывами мегатонной мощности может поднять достаточно «почвы, чтобы вызвать новый ледниковый период». Сегодня эта формулировка кажется довольно странной, но семь десятилетий назад она была очень смелой.

В 1966 г. корпорация РЭНД опубликовала доклад Э. С. Баттена «Влияние ядерной войны на погоду и климат», где на основе анализа потенциальных пылевых эффектов от взрывов на поверхности Земли отмечается, что «в дополнение к воздействию пыли и частиц почвы, обширные пожары, вызванные ядерными взрывами, могут изменить характеристики поверхности Земли» и влиять на местные погодные условия, «однако для определения их точной природы, протяженности и магнитуды необходимо более глубокое знание атмосферы» [Batten, 1966].

В 1968 г. был опубликован доклад ООН «Последствия возможного применения ядерного оружия, а также последствия приобретения и дальнейшего развития ядерного оружия для экономики государств» [United Nations..., 1968]. К этому времени уже были хорошо известны

многие медико-биологические и экономические последствия применения ядерного оружия, последствия глобального радиационного заражения и разрушения озона.

В заключительной части этого доклада говорилось: «В настоящем докладе лишь в общих чертах описываются бедствия, которые могли бы возникнуть в результате применения ядерного оружия... Угроза неизмеримых бедствий, которые могли бы обрушиться на человечество в случае возникновения когда бы то ни было ядерной войны либо в силу неправильного расчета, либо в силу безумного намерения, настолько реальна, что осведомленные люди во всем мире теряют, вполне понятно, терпение в ожидании мер по разоружению... А чем дольше ждет мир, чем больше растут ядерные арсеналы, тем сложнее конечная задача» [United Nations..., 1968].

Количество запасов ядерного оружия в мире продолжало возрастать, и в 70-х гг. XX в. остро встал вопрос об изучении воздействия взрывов большой мощности на крупные города и промышленные центры, а также глобальных долгосрочных последствий ядерной войны.

Фундаментальный отчет Национальной академии наук США «Долговременные широкомасштабные эффекты множественных ядерных взрывов» [National Research Council, 1975] был посвящен в основном проблемам радиоактивного заражения окружающей среды, разрушению озона и запылению (не задымлению) атмосферы в результате большого количества ядерных взрывов.

Особенностью этого отчета Американской академии наук была большая неопределенность не только в величинах, но даже в знаках полученных результатов, что создавало впечатление, что существование каких-нибудь значительных последствий ядерной войны не может быть установлено достоверно. В отчете утверждалось, что разрушения озона и запыления стратосферы легко избежать, если не применять ядерное оружие мощностью более 1 Мт.

Авторы отчета признавали возможность того, что радиоактивные осадки могут иметь глобальный характер и вызвать в течение последующих десятилетий гибель десятков миллионов человек по всей Земле от рака и генетических изменений. Ионизирующая радиация может также вызвать многочисленные мутации в растительном и жи-

вотном мире и совершенно непредсказуемым образом изменить экологическую ситуацию.

Уменьшение озонового слоя в этом докладе оценивалось в 30–70% при использовании оружия мощностью в несколько мегатонн, а также при суммарной мощности взрывов 10 тыс. Мт, и отмечалось, что разрушение озона окажет существенное влияние на нагрев стратосферы и, может быть, незначительное воздействие на температуру у поверхности Земли.

Что касается пыли, поднятой в воздух ядерными взрывами, то ее эффект в этом докладе сравнивался с извержением вулкана Кракатау в 1883 г. И в том, и в другом случаях количество аэрозоля, попавшего в стратосферу, оценивалось примерно в 10^7 – 10^8 т.

Климатические изменения, согласно этому докладу, сводятся к похолоданию за счет пылевого загрязнения верхних слоев атмосферы в среднем менее чем на один градус на время до нескольких лет. Это похолодание может быть менее ощутимым в тропических районах и более заметным в средних и полярных широтах. Такое похолодание может заметно понизить урожаи сельскохозяйственных культур в умеренных широтах.

30 июня 1978 г. был принят Заключительный документ первой специальной сессии Генеральной Ассамблеи ООН по разоружению [Заключительный документ..., 1978], в котором, в частности, говорится: «Ядерное оружие создает величайшую опасность для человечества и для существования цивилизации. Необходимо остановить и повернуть вспять гонку ядерных вооружений во всех ее аспектах с тем, чтобы предотвратить опасность возникновения войны с применением ядерного оружия. Конечной целью в этом плане является полная ликвидация ядерного оружия».

Генеральная ассамблея ООН поставила перед учеными задачу оценить воздействие ядерных взрывов на крупные города и промышленные центры, а также возможные глобальные последствия ядерной войны. В 1980 г. генеральному секретарю ООН был представлен доклад «Всеобъемлющее исследование, касающееся ядерного оружия» [Всеобъемлющее исследование..., 1981], подготовленный группой экспертов, в которую входили ученые, дипломаты и военные специалисты из многих стран мира.

В этом докладе ООН приводится общий обзор физических последствий ядерного взрыва, а затем предпринимается попытка описать гипотетические эффекты отдельных взрывов различной мощности (от килотонных до мегатонных зарядов). Особое внимание уделяется взрывам килотонной и мегатонной мощности над городами. Так, например, если бы бомба, аналогичная сброшенной на Хиросиму, была применена против города с населением более 7 млн человек (типа Нью-Йорка или Москвы в те годы), то при отсутствии оповещения непосредственные жертвы составили бы от 500 тыс. до 1 млн человек, из которых 200 тыс. погибли бы в момент взрыва. Если взрыв произойдет во время рабочего дня, то число жертв вполне может превысить 1 млн человек.

Со ссылкой на исследование Отдела по оценке технологии (ООТ) конгресса США [Office of Technology Assessment..., 1979] проводится анализ последствий взрыва мощностью 1 Мт над центром города с населением 4 млн человек (типа Детройта или Петербурга в те годы). Этот анализ показывал, что воздушный взрыв, произведенный ночью на высоте около 2 км, немедленно уничтожит и поразит свыше 1 млн человек. Кроме того, в исследовании ООТ было показано, что десять взрывов мощностью по 40 кт, т.е. в сумме 0.4 Мт, эпицентры которых находятся на расстоянии 2 км друг от друга, приведут к гораздо более серьезным последствиям.

Раздел доклада о последствиях полномасштабной ядерной войны начинается словами: «Тотальная ядерная война — это высшая степень сумасшествия!». В докладе высказывается сомнение о возможности ограниченной ядерной войны, «поскольку всегда существует весьма значительный риск эскалации войны». Несмотря на такое утверждение, в докладе уделяется некоторое внимание обсуждению эффектов «ограниченного ядерного нападения» и применения тактического ядерного оружия [Всеобъемлющее исследование..., 1981].

Оценки глобальных аспектов воздействия крупной ядерной войны на окружающую среду, представленные в исследовании ООН 1980 г., в основном базируются на отчете Национальной академии наук США 1975 г. Однако даже из этих очень осторожных оценок эксперты ООН делают вывод о неизбежности грандиозных социальных, экономических и политических последствий.

В докладе указывается, что после ядерной войны торговля, транспорт, экономика, сельское хозяйство пострадают во всем мире: «Фактически нет оснований полагать, что политическое и социальное положение в любой стране останется неизменным после крупной ядерной войны. Многие из существующих в настоящее время стран, по-видимому, просто исчезнут. Другие в результате голода или массовой миграции могут лишиться практически всего населения» [Всеобъемлющее исследование..., 1981].

Среди эффектов, вызываемых ядерными взрывами, в исследовании ООН упоминаются возможность возникновения крупных городских и лесных пожаров, а также воздействие электромагнитного импульса, подобного разряду молнии и возникающего при ядерных взрывах на линиях электропередач и связи, на электронные вычислительные машины (ЭВМ).

Ключевая мысль экспертов ООН: «Данный доклад должен, по крайней мере, продемонстрировать катастрофические последствия того, что произойдет, если ядерные арсеналы сегодняшнего или завтрашнего дня будут когда-либо применены в военных действиях. Возможно, что кто-то пожелает утешиться расчетами, показывающими трудность уничтожения даже в ходе ядерной войны всех без исключения людей на Земле, включая женщин и детей. Но эти расчеты являются пустыми упражнениями. Опасность уничтожения человеческой цивилизации не должна быть объектом теоретических споров, а должна стать основой для всеобщего осознания как опасности положения, так и необходимости проявления политической воли для поисков приемлемых решений» [Всеобъемлющее исследование..., 1981]. Эта цитата хорошо описывает как мировое сообщество сорок с лишним лет назад относилось к возможности использования ядерного оружия.

Автору неизвестны исследования советских и европейских экспертов того времени, посвященные этой непростой теме. Возможно, когда-нибудь с них снимут гриф «секретно», и картина станет более полной.

Научные исследования, приведшие к возникновению гипотез «сумерек в полдень» и «ядерной зимы», заслуживают отдельного внимания. Это исследования антропогенного воздействия на атмосферу и климат, климатических эффектов

массовых лесных и городских пожаров, крупнейших извержений вулканов, сравнительного анализа атмосфер Земли и Марса. Отметим в этом контексте две статьи, вышедшие в 1973 г. и посвященные динамике и радиационным эффектам пылевых бурь на Марсе [Golitsyn, 1973; Гинзбург, 1973].

Что касается так называемой «фотохимической войны» [Hampson, 1974; Johnston, 1977], они базируются на исследовании образования NO_x в результате нагрева двигателя при полетах в стратосфере сверхзвуковых самолетов. Дж. Хэмпсон предположил, что шаровые молнии, которые могут возникнуть в случае полномасштабного ядерного обмена, приведут к образованию большого количества NO_x , и истощению озонового слоя на год или более долгий период.

Эта гипотеза, которая в значительной мере опиралась на работы будущего Нобелевского лауреата П. Крутцена [Crutzen, 1970; Crutzen, 1971; Crutzen, 1972], обнаружившего, что оксиды азота (NO_x) могут быть эффективным катализатором разрушения стратосферного озона, легла в основу отчета Национального исследовательского совета США (NRC) «Долгосрочные последствия многократных взрывов ядерного оружия во всем мире», опубликованного в 1975 г., где основное внимание уделено разрушению озонового слоя после ядерной войны [National Research Council, 1975].

На русском языке выводы этого доклада и развернутые комментарии к ним опубликованы в обзорах [Кондратьев и др., 1985; Кондратьев и Никольский, 1986]. Перечислим основные из этих выводов.

1. Выбросы в стратосферу окислов азота в результате ядерных взрывов могут привести к уменьшению общего содержания озона на 30–70% с последующим частичным восстановлением содержания озона через 2–4 года.
2. Результатом выбросов окислов азота и пыли может быть понижение температуры на несколько градусов, но возможно и слабое потепление. *Вероятнее всего, что климатические последствия не выйдут за пределы обычной изменчивости* (выделено автором).
3. Несмотря на первоначальное воздействия взрывов на экосистемы, они достаточно полно восстановятся через 25 лет.

4. Значительным может быть воздействие на продуктивность сельского хозяйства, преимущественно за счет увеличения интенсивности УФ-радиации в связи с уменьшением содержания озона в стратосфере.
5. Усиление ионизирующей радиации может негативно влиять на биосферу и вызывать рост раковых и генетических заболеваний.

Авторы российского обзора [Кондратьев и Никольский, 1986], как и многие другие специалисты в области физики и химии атмосферы, биологии и медицины, справедливо отмечали очень большие неопределенности и даже противоречивость многих выводов отчета NRC. Особенно это относилось к неопределенности вывода, что будет «то ли похолодание, то ли потепление» в результате выброса окислов азота и пыли и уменьшении содержания озона, которая была связана, с одной стороны, с недостаточностью изученности физических и особенно химических процессов в атмосфере, а с другой — с отсутствием адекватных климатических моделей.

Приближенные оценки с помощью одномерной модели химических процессов в атмосфере, используемой в [National Research Council, 1975], показывали, что вскоре после взрывов общей мощностью в 10^4 Мт общее уменьшение содержания озона в стратосфере Северного полушария может достигнуть 70%, а в Южном полушарии составить около 20% (см. также [Johnston et al., 1973; Whitten, 1976] и др.).

Предпринимались попытки обнаружить уменьшения содержания озона в стратосфере после испытания мощных ядерных зарядов с помощью данных наземных и спутниковых измерений. Последняя серия таких испытаний была в конце 50-х—начале 60-х гг. XX в., когда суммарная мощность взорванных зарядов составила согласно [Foley and Ruderman, 1973] около 300 Мт, а самый мощный в истории взрыв был мощностью свыше 50 Мт. Выявление воздействия этих испытаний на общее содержание озона в атмосфере является не простой задачей из-за большой пространственной и временной изменчивости озонового слоя. В работе [Reinsel, 1981] по специальной методике, с использованием так называемого «метода маски», удалось установить, что за год после мощнейшего взрыва содержание озона в атмосфере уменьшилось на 1.5–4.5%.

Дальнейшие исследования показали, что воздействие на человечество запыления атмосферы и образования окислов азота при ядерных взрывах, которые разрушают озоновый слой, невелико по сравнению с катастрофическими климатическими последствиями массовых пожаров ядерной войны. Исследования воздействия ядерного оружия на озоновый слой продолжаются и в наше время. Здесь можно отметить работу [Stenke et al., 2013], основной вывод которой сформулирован очень точно — лучшей страховкой от катастрофических последствий ядерных взрывов было бы признание ядерного оружия незаконным.

«Сумерки в полдень»

Уже в работах 50-х–70-х гг. XX в. обращалось внимание на то, что многочисленные ядерные взрывы могут быть причиной массовых пожаров, а возникшие после бомбардировок Хиросимы и Нагасаки пожары неоднократно сравнивали с грандиозными пожарами Токио, Гамбурга и Дрездена, возникшими в результате массированных бомбардировок обычными боезарядами.

Однако только П. Крутцен и Дж. Биркс [Crutzen and Birks, 1982] в статье, опубликованной в специальном сдвоенном выпуске журнала «Амбио», впервые оценили количество дыма, сажи и смога, которые могут образоваться при полномасштабном ядерном конфликте, и показали, что этого количества достаточно, чтобы существенно ослабить солнечный свет у поверхности Земли.

Интересна история данного исследования. Перед тем как в 1980 г. стать директором Департамента химии атмосферы Института химии общества Макса Планка, П. Крутцен руководил отделом качества воздуха Национального центра атмосферных исследований в Боулдере (Колорадо, США), где работал Джон Биркс. В 1981 г. Биркс взял в университете Колорадо творческий отпуск (sabbatical leave), и в Майнце (тогда Западная Германия) Крутцен и он осуществляли спонсированное Шведской королевской академией наук исследование, результаты которого были опубликованы в июньском номере журнала «Ambio» за 1982 г. Именно эта статья, «Сумерки в полдень», привела ученых к концепции «ядерной зимы».

Главный результат состоял в том, что по оценкам авторов поступление солнечной энергии к поверхности океана и суши в летний полдень

из-за пожаров ядерной войны может уменьшиться от 2 до 150 раз на половине площади Северного полушария Земли. Аннотация статьи гласит: «В результате ядерной войны огромные площади лесов превратятся в дым — что соответствует, по крайней мере, общей площади суши Дании, Норвегии и Швеции. В дополнение к огромным пожарам, которые будут неделями бушевать в городах и промышленных центрах, пожары также будут бушевать на пахотных землях, и вполне вероятно, что будет уничтожено по меньшей мере 1.5 млрд т имеющихся в разных странах запасов ископаемого топлива (в основном нефти и газа). В результате пожаров образуется толстый слой дыма, который резко уменьшит количество солнечного света, достигающего поверхности Земли. Эта темнота будет сохраняться в течение многих недель, что сделает любую сельскохозяйственную деятельность в Северном полушарии практически невозможной, если война разразится в период вегетации» [Crutzen and Birks, 1982].

Напомним основные положения этой статьи, касающиеся аэрозольных (дымовых) эффектов пожаров ядерной войны, которые особенно важны для дальнейшего понимания «ядерной ночи» и «ядерной зимы», не останавливаясь в деталях на химических и фотохимических эффектах. Такое изложение пионерских научных работ всегда очень важно для понимания проблемы в целом.

Авторы отмечают, что предыдущие (до 1982 г.) исследования атмосферных последствий ядерной войны были сосредоточены, главным образом, на ожидаемом значительном истощении озонового слоя в стратосфере, которое приводит к резкому повышению уровня вредного ультрафиолетового излучения на поверхности Земли.

Принципиально новым достижением авторов стало обсуждение состояния атмосферы после многочисленных пожаров, которые могут возникнуть в результате ядерных взрывов в городах, лесах, на сельскохозяйственных угодьях, нефтяных и газовых месторождениях. В результате этих пожаров в атмосферу поступит огромное количество частиц субмикронных размеров, сильно поглощающих свет, настолько большое, что в полдень солнечное излучение у поверхности Земли уменьшится по меньшей мере в два, а, возможно, и более чем в сто раз. Кроме того, пожары выбрасывают в атмосферу большие количества оксидов азота и химически активных углеводородов, что создает потенциальную возможность

образования фотохимического смога на большей части Северного полушария, который может сохраняться в течение нескольких месяцев после осаждения твердых частиц на поверхность Земли. Такие эффекты, как отмечают авторы, были ранее в значительной степени упущены из виду или не были тщательно изучены.

В этой прорывной статье впервые описаны оптические и радиационные эффекты дымов от пожаров ядерной войны. С точки зрения воздействия на атмосферу «наиболее серьезные последствия ядерной войны, скорее всего, будут вызваны многочисленными пожарами, которые начнутся во время войны и не смогут быть потушены из-за радиоактивного загрязнения, разрушения систем водоснабжения, потерь противопожарного оборудования и квалифицированного персонала» [Crutzen and Birks, 1982].

Весьма вероятно, что к идее тщательного рассмотрения эффектов массовых пожаров ядерной войны авторов привела, в частности, статья К. Льюиса [Lewis, 1979], который обратил внимание на разрушительные последствия пожаров от ядерных взрывов в городских условиях и показал, что атмосферные эффекты городских пожаров были бы особенно драматичными.

Ядерные взрывы могут быть причиной различных типов пожаров в городских и промышленных центрах, в лесах и на сельскохозяйственных землях, на месторождениях природного газа и нефти, которые также будут разрушены в результате ядерных взрывов. Авторы предположили, что сгорит 10^6 км² лесов, что примерно соответствует общей площади Дании, Норвегии и Швеции. Разрушения газовых и нефтяных скважин приведет к газовым выбросам в количестве, соответствующему текущему уровню потребления нефти и газа во всем мире. По мнению авторов, это «оценка снизу реальных масштабов пожаров, которые могли бы возникнуть в случае крупной ядерной войны».

В статье описаны наиболее известные лесные пожары, приводившие к существенному ослаблению солнечного света на больших территориях. Авторы пишут, что давно известные природные явления, такие как «темные дни», «сухой туман», «индейское (бабье) лето» и «цветной дождь», приписываются дыму, образующемуся при пожарах в лесах, прериях и торфяных болотах [Crutzen and Birks, 1982].

В результате больших лесных пожаров 13–17 октября 1918 г. в Миннесоте и прилегающих районах Висконсина образовался слой дыма, вызвавший сильные оптические эффекты, наблюдавшиеся даже на восточном побережье США. Очень показателен отчет о пожарах в Цинциннати, Огайо, где сказано: «В 3 часа дня дым и дымка стали плотнее, но солнечный свет и его диск были видны до 3 : 35 вечера, после чего солнце полностью скрылось. Объекты в это время не были видны на расстоянии 300 футов» [Lyman, 1919].

Более 100 лесных пожаров на северо-западе штата Альберта и северо-востоке штата Британская Колумбия привела к «Great Smoke Pall» осенью 1950 г. В прессе сообщалось о том, что дым наблюдался даже в Англии и Франции [Wexler, 1950; Smith, 1950]. Особенно пострадали большая часть Канады и восточная треть континентальной части США. На востоке США дым был ограничен диапазоном высот около 2.5–4.5 км, так что видимость на поверхности Земли не ухудшалась. Однако Солнце было настолько затемнено, что было видно невооруженным глазом и имело фиолетовый или лавандовый цвет. Измерения в Вашингтоне, округ Колумбия, показали, что интенсивность солнечного излучения снизилась в два раза при отсутствии облаков в районах с подветренной стороны (как правило, к востоку от очагов возгорания).

В Северном полушарии, особенно в Канаде и СССР, обширные леса расположены вблизи важных городских стратегических центров, так что можно ожидать, что многие лесные пожары вспыхнут во время и после обмена ядерными ударами. Конечно, трудно оценить, какая площадь лесов может сгореть, но, как пишут авторы, общая площадь пожаров ядерной войны в Северном полушарии существенно превысит млн км². Эти оценки основаны на многочисленных работах XX в. таких как [Plummer, 1912; Lyman, 1919; Shostakovitch, 1926; Wexler, 1950; Smith, 1950; Bull, 1951; Chandler et al., 1963; Ward et al., 1976; Seiler and Crutzen, 1980; Софронов и Вакуров, 1981].

По оценкам Лесной службы США, ядерная атака на США мощностью 1500 Мт сожгла бы площадь суши $0.4\text{--}6 \times 10^6$ км² [Federation of American Scientists, 1981]. Вся эта информация указывает на то, что предположение о площади леса в 10^6 км², которая может быть уничтожена пожаром, не является преувеличением.

Площадь леса в 10^6 км² содержит в среднем около 2.2×10^{16} г сухого вещества или около 10^{16} г углеродной фитомассы [Bolin et al., 1979] и около 10^{14} г связанного азота, не считая материала, который содержится в органическом веществе почвы. Как правило, во время лесных пожаров сжигается около 25% доступной фитомассы [Seiler and Crutzen, 1980], что соответствует выбросу в атмосферу 2.5×10^{15} г углерода. Во время лесных пожаров на тонну сгоревшего лесного материала образуется около 75 кг твердых частиц, или 450 кг углерода [Ward et al., 1976]. Это значит, что при лесных пожарах такого масштаба в атмосферу выбрасывается 4×10^{15} г твердых частиц.

По данным [Ward et al., 1976], площадь лесов, ежегодно сгораемых в США, за исключением Аляски, составляет около 1.8×10^4 км², что соответствует выделению 3.5×10^{12} г твердых частиц в атмосферу. Общая площадь лесных пожаров в 10^6 км² привела бы к выбросу в атмосферу 2×10^{14} г твердых частиц, что соответствует 3×10^{15} г сгоревшего лесного материала, или 1.3×10^{15} г углерода. Для оценки возможных последствий «ядерных» пожаров Крутцен и Биркс используется диапазон $1.3\text{--}2.5 \times 10^{15}$ г углерода в виде глобального выброса газов в атмосферу и $2\text{--}4 \times 10^{14}$ г в виде твердых частиц [Crutzen and Birks, 1982].

Основная масса (> 90%) твердых частиц, образующихся в результате лесных пожаров, состоит из частиц диаметром менее 1 μm и максимальной плотностью частиц при диаметре 0.1 μm . Этот материал имеет очень высокое содержание органических веществ (40–75%), и большая его часть образуется из газообразных органических предшественников. Его состав в среднем таков: 55% смолы, 25% сажи и 20% золы. Эти частицы сильно поглощают солнечный свет и инфракрасное излучение.

Поскольку большинство частиц дыма имеют субмикронный размер, их среднее время пребывания в атмосфере составляет около 5–10 сут. Если предположить, что лесные пожары продлятся в течение двух мес. [Shostakovitch, 1926], распространение $2\text{--}4 \times 10^{15}$ г аэрозоля над половиной Северного полушария приведет к суммарному среднему содержанию дымовых частиц в вертикальном столбе 0.1–0.5 г/м². В результате среднее проникновение солнечного света на землю летом в полдень будет снижено в 2–4

раза. Это означало бы, что большая часть Северного полушария будет затемнена в дневное время в течение длительного периода времени после обмена ядерными ударами. Крупномасштабные атмосферные последствия массовых лесных пожаров были задокументированы в ряде работ и, в частности, в статье В. Шостаковича о сибирских пожарах 1915 г. [Shostakovitch, 1926]. Крупные лесные пожары в арктических регионах обычно сопровождаются огромными пожарами на торфяных болотах, которые могут распространяться на глубину более 2 м без какой-либо возможности их тушения. Образование аэрозоля при торфяных пожарах не рассматривались.

В городах и промышленных центрах находится огромное количество горючих материалов и химикатов. В статье предполагается, что в мире хранится около 1.5×10^{15} г ископаемого топлива (1.5 млрд т).

Запасы нефти и газа, находящиеся в скважинах под высоким давлением, при ядерных взрывах загорятся, что приведет к огромным пожарам и выбросам в атмосферу. Крутцен и Биркс пишут: «Конечно, ядерные державы не могут нацелиться на все более чем 600 000 газовых и нефтяных скважин в мире. Однако определенные регионы мира, где крупные места добычи нефти и газа сосредоточены на небольших территориях, вероятно, станут главными целями в ядерной войне». Они приводят в качестве примера один из наиболее известных взрывов газовых скважин — «Дьявольская зажигалка» — на месторождении Гасси-Туиле в Сахаре. Эта скважина выбрасывала 15×10^6 м³ газа в сут, пока пламя высотой 200 м не было окончательно потушено взрывчаткой, и скважина не была перекрыта.

В качестве примера того, как очень небольшое количество взрывчатки может быть использовано для выброса большого количества природного газа, авторы рассматривают газовые месторождения Нидерландов. В 1980 г. добыча 7.9 млн м³ природного газа в Гронингене составила 38% от общего объема добычи в Западной Европе и 5% от этого показателя для всего мира. Большая часть добычи газа в Нидерландах сосредоточена на месторождении площадью около 700 км². Вполне вероятно, что ядерный взрыв мощностью 300 кт вскрыет все газовые скважины в радиусе 1 км либо путем расплавления металлических труб и клапанов, либо путем

обрыва труб или разрушением обсадных колонн скважин с помощью ударных волн, распространяющихся в земле. Согласно данным [Nuclear Bomb Effects..., 1977], радиус огненного шара составляет 0.9 км, при взрыве на поверхности образуется кратер глубиной приблизительно 50 м и диаметром 270 м, максимальное избыточное давление на высоте 1 км составит 3.1 атм., минимальное динамическое давление на 1 км составит 3.4 атм., а максимальная скорость ветра на высоте 1 км достигнет 1700 км/ч.

Существуют и многие другие регионы мира, где добыча газа и нефти сосредоточена на небольших площадях. Производство в США значительно более рассредоточено, чем в других странах. В 1980 г. в США добывалось в среднем 8.6 млн баррелей нефти в день примерно из 530 000 скважин, в то время как в СССР добыча составляла 12.1 млн баррелей нефти в день только из 80 000 скважин. Нефтяные и газовые месторождения Советского Союза, особенно нефтедобывающий Волго-Уральский регион и газовые и нефтяные месторождения региона Оби сильно локализованы и особенно уязвимы при ядерной атаке.

Относительно возможных климатических последствий ядерного конфликта Крутцен и Биркс высказываются очень осторожно: «мало что можно сказать с уверенностью», но отмечают, что увеличение содержания тропосферного озона, метана и других газов может привести к некоторому повышению температуры на поверхности Земли [Wang et al., 1976; Fishman et al., 1979], в то время как поглощающий аэрозоль, образующийся в результате пожаров, изменит химический и радиационный баланс поверхности и атмосферы Земли. Более длительные последствия могут быть вызваны изменениями отражающих свойств поверхности суши из-за многочисленных пожаров.

«Ядерная зима»

Термин «ядерная зима» был предложен Ричардом Турко и впервые использован в опубликованной в журнале Science в декабре 1983 г. статье [TTAPS, 1983a]. Более полно эти результаты представлены в отчете [TTAPS, 1983b]. Еще с конца 1982 г. [Turco R.P., Toon O.B., Pollack J.B., Sagan C., 1982] основные результаты этого исследования начали докладываться на международных встречах и семинарах, и стали широко известны мировой научной общественности.

Наиболее значимой была конференция «Мир после ядерной войны» (The World after Nuclear War), состоявшаяся в Вашингтоне в октябре – ноябре 1983 г. В конференции приняли участие более 200 ученых из многих стран. В рамках конференции состоялся телемост Москва–Вашингтон и диалог между советскими и американскими учеными о «ядерной зиме». Материалы этой конференции были опубликованы в книге под редакцией П. Эрлиха и К. Сагана с примечательным названием «The Cold and the Dark. The Book that Explains Nuclear Winter» [Ehrlich P.R. et al., 1984].

Возвращаясь к работе TTAPS, напомним, что ее авторы были специалистами из разных областей: Ричард Турко – атмосферные науки, Оуэн Брайен Тун – астрономия, Томас Аккерман – атмосферные науки, Джеймс Поллак – астрономия, Карл Саган – астрономия. Саган был старшим и более знаменитым из них, более того, Поллак и Тун были его аспирантами. Автор слышал легенду, что Саган присоединился к этому коллективу на завершающей стадии подготовки серии публикаций TTAPS, и его младшие соавторы специально конструировали такую аббревиатуру, чтобы S (Саган) был бы в конце списка. За достоверность этой легенды автор не ручается.

Несколько ранее (в январе того же 1983 г.) в SCIENCE вышла статья Поллака, Туна, Аккермана, МакКея и Турко «Environmental Effects of an Impact-Generated Dust Cloud: [Implications for the Cretaceous-Tertiary Extinctions]» [Pollack et al., 1983] с участием четырех из пяти авторов TTAPS. Собственно, идеи и методы, представленные в этом исследовании, и легли в основу первых результатов американских авторов по оценке климатических последствий полномасштабного ядерного обмена.

В 80-е годы XX века было опубликовано огромное количество научных, обзорных и популярных статей о возможных атмосферных и климатических последствиях ядерной войны, часть из которых представлена в списке литературы к данной статье.

С точки зрения автора, наиболее фундаментальным изданием является отчет Научного комитета по проблемам окружающей среды (SCOPE) Международного совета научных союзов (ICSU), объединявшего в те годы пред-

ставителей 74 национальных академий наук, 20 международных научных союзов и 26 других научных организаций. Результатом проекта SCOPE ENUWAR стал двухтомник «SCOPE 28: Environmental Consequences of Nuclear War» [SCOPE 28, 1985; SCOPE 28, 1989], первый том которого был посвящен исследованиям климатических последствий возможной ядерной войны, а второй — экологическим и сельскохозяйственным последствиям. Первое издание этого двухтомника было осуществлено в 1985 г., а второе и существенно дополненное (в том числе и описанием работ советских ученых) — в 1989 г. Первое издание было переведено на русский язык [Последствия..., 1988].

В 1990 г. в Science была опубликована обзорная статья «Climate and Smoke: An Appraisal of Nuclear Winter» [TTAPS, 1990], которая в некотором смысле подвела итог первому периоду изучения «сумерек в полдень» и «ядерной зимы». Несмотря на практически полный консенсус в мировом научном сообществе в отношении гипотезы «ядерной зимы», естественно, были и яростные отрицатели этой теории, наиболее известным из которых был «отец водородной бомбы» Эдвард Теллер [Teller, 1984].

В нашей стране на базе пионерских работ Г.С. Голицына по динамике планетных атмосфер [Голицын, 1973; Golitsyn, 1983] и работы автора этой статьи о радиационном режиме поверхности и запыленной атмосфере Марса во время «великого противостояния» Земли и Марса в 1972 г. [Гинзбург, 1973] удалось построить простую аналитическую модель катастрофического похолодания на Земле в гипотетическом случае возникновения крупномасштабных пожаров от массового применения ядерного оружия [Климатические последствия..., 1983; Golitsyn, Ginzburg, 1985]. Эта модель оказалась впоследствии применима для оценки температурных эффектов крупных лесных и нефтяных пожаров.

Поскольку основным механизмом формирования феномена «ядерной зимы» являются массовые пожары, то в ИФА АН СССР в 80-е гг. XX в. были развернуты работы по исследованию возможных атмосферных и климатических последствий полномасштабного ядерного конфликта и поиска природных аналогов этой климатической катастрофы.

Численное моделирование феномена «ядерной зимы»

Семидесятые и восьмидесятые годы прошлого столетия были временем становления численных моделей общей циркуляции атмосферы и океана, в первую очередь, в США и в СССР. Одним из ведущих институтов этого направления был Вычислительный центр АН СССР, где под руководством Никиты Николаевича Моисеева работала группа сильных физиков и математиков, в том числе В.В. Александров и Г.Л. Стенчиков, которые в 1983 г. вместе с П.Л. Архиповым и В.П. Пархоменко опубликовали в журнале «Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана» пионерскую по тем временам статью «Глобальная модель системы океан — атмосфера и исследование ее чувствительности к изменению концентрации CO_2 » [Александров, Архипов, Пархоменко, Стенчиков, 1983]. В США в эти годы также стремительно развивались численные модели общей циркуляции атмосферы.

Одновременно большое развитие получили и простые 0-мерные и одномерные модели радиационного и радиационно-конвективного равновесия атмосферы и подстилающей поверхности. Одна из моделей этого семейства использована в работах TTAPS.

В обзорной статье [Robock et al., 2007] приводится сводная таблица моделей, использовавшихся в 80-е гг. XX в. для описания «ядерной зимы», и отмечается, что с этого времени и до середины нулевых годов XXI века была длительная пауза в численном моделировании этого феномена. Приведем эту таблицу в части работ 1983–1991 гг. с добавлением модели, разработанной в ИФА АН СССР [Климатические последствия..., 1983].

В [TTAPS, 1983a and 1983b] была использована одномерная радиационно-конвективная модель с нулевой теплоемкостью поверхности, которая применима для оценки климатических эффектов в континентальных условиях. Это позволило смоделировать эволюцию вертикальной структуры атмосферы после пожаров ядерной войны, но не позволило описать пространственно-временное распределение динамики климатической катастрофы.

В работе [Александров и Стенчиков, 1983], выполненной под научно-организационным руководством Н.Н. Моисеева (в то время заместителя директора Вычислительного центра

Таблица. Численные модели «ядерной зимы» 80-х годов XX века

Ссылка	Тип модели	Размер ячейки (широта и долгота)	Количество уровней по вертикали	Верхний уровень модели	Сезонный цикл / непрерывный расчет	Период расчетов и число прогонов
TTAPS, 1983	SCM	Нет	60	38 км	Нет / да	300 дней 10 прогонов
Александров и Стенчиков, 1983	AGCM	$12 \times 15^\circ$	2	Тропопауза	Нет / да	400 дней 1 прогон
Климатические последствия..., 1983 Golitsyn and Ginsburg, 1985, Вельтищев и др. 1988.	EBM	Нет	2	Тропопауза	Нет / да	
Robock, 1984	EBM	$10 \times 180^\circ$	1	Нет	Да / да	4 года 9 прогонов
Covey et al., 1984; Thompson, 1985;	AGCM	$4.5 \times 7.5^\circ$	9	20 км	Да / нет	20 дней 3 прогона
Malone et al., 1986	AGCM	$4.5 \times 7.5^\circ$	20	32 км	Да / нет	40 дней 8 прогонов
Ghan et al., 1988	AGCM	$4 \times 5^\circ$	2	Тропопауза	Да / нет	30 дней 21 прогон
Pittock et al., 1989	AGCM	$4.4 \times 7.5^\circ$	9	31 км	Да / нет	105 дней 2 прогона
Ghan, 1991	AGCM	40×50	2	Тропопауза	Да / да	1.5 года 3 прогона

АН СССР), впервые для оценки климатической реакции на выбросы дыма в результате ядерного обмена авторы использовали модель атмосферы, интерактивно связанную с перемешанным слоем океана, с очень низким пространственным разрешением ($12 \times 15^\circ$ по широте и долготе соответственно) и только двумя уровнями по вертикали, со среднегодовой инсоляцией. По этой модели был проведен один расчет для периода в 400 дней. В сценарии с использованием около одной трети тогдашнего ядерного потенциала количество создаваемого дыма оценивалось величиной в 150 Tg. Эти расчеты показали, что в результате пожаров ядерного конфликта может иметь место снижение температуры у земной поверхности до значений значительно ниже температуры замерзания и возникает

циркуляция в атмосфере, которая способствует глобальному распространению дыма. История и результаты этих работ описаны, в частности в монографии [Моисеев, Александров, Тарко, 1985] и очень красочно в воспоминаниях Н.Н. Моисеева [Моисеев, 1994].

В работе [Robock, 1984] была использована простая энерго-балансовая модель с учетом перемешанного слоя океана для изучения полного сезонного цикла реакции климатической системы в течение годового периода расчета.

В работах [Covey et al., 1984; Thompson, 1985; Malone, 1985; Schneider and Thompson, 1988; Ghan, 1991] была использована модель общей циркуляции атмосферы Национального Центра по исследованию атмосферы США (NCAR), что позволило рассмотреть сезонный цикл

климатических эффектов ядерного обмена. Подробное описание численных экспериментов по трехмерному моделированию атмосферных эффектов массовых пожаров ядерной войны требует отдельного серьезного обзора и выходит за рамки данной статьи. Отметим ещё ряд наиболее интересных работ 80-х годов [Barton and Paltridge, 1984; Hobbs et al, 1984; Haberle et al, 1984; Ramaswamy et al., 1985; Malone et al., 1986; Penner, 1986; Pine and Omi, 1986; Nelson, 1989].

*Простейшие модели «ядерной зимы»
и ее природных аналогов*

Чтобы объяснить «на пальцах» механизм образования климатического феномена «ядерной зимы», а заодно аэрозольных климатических катастроф типа падения гигантского астероида, массовых пожаров, земных и марсианских пылевых бурь, рассмотрим простейшую модель энергетики поверхности и атмосферы планеты.

Основную идею такой модели предложила разработать автору этого обзора на рубеже 60-х и 70-х годов прошлого столетия Ева Михайловна Фейгельсон, сказав при этом: «Саша, я Вам практически написала кандидатскую, а то и докторскую диссертацию». Это были почти пророческие слова. Во многих своих работах автор широко использовал идеи своего научного руководителя.

Главная идея такой простейшей модели заключалась в следующем. Поскольку атмосфера Земли в тепловом диапазоне обладает оптической толщиной порядка единицы (примерно равна двум), то потоки собственного излучения атмосферы к поверхности Земли и в космическое пространство не очень сильно отличаются друг от друга. В этой ситуации в первом (нулевом) приближении можно ввести среднюю температуру атмосферы и рассматривать земную климатическую систему как двухслойную (поверхность и «изотермическая» атмосфера). В этой простейшей модели для определения температуры поверхности и средней температуры атмосферы достаточно знать только солнечную постоянную на орбите Земли — I_0 (Вт/м²) и безразмерные величины: A — альбедо планеты, a_s — доля солнечной радиации, поглощаемая поверхностью планеты, D — интегральная функция пропускания теплового излучения атмосферой планеты. Тогда температура поверхности — T_s (К) и атмосфе-

ры планеты — T_a (К) определяется системой двух уравнений (1) и (2), где σ — постоянная Стефана-Больцмана ($5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт · м⁻² · К⁻⁴), а средняя по поверхности планеты инсоляция $I = I_0/4$, поскольку площадь поверхности шара в 4 раза больше площади большого сечения.

$$\sigma T_s^4 D + \sigma T_a^4 (I - D) = I(1 - A); \quad (1)$$

$$\sigma T_s^4 - \sigma T_a^4 (I - D) = a_s I. \quad (2)$$

Такая простейшая модель, естественно, не может описывать малые климатические изменения и вертикальную термическую структуру атмосферы, но дает вполне разумные результаты в ситуации резких изменений температуры поверхности планеты, как в случае, например, марсианских глобальных пылевых бурь или «ядерной зимы». На рис. 1 и 2 репринтно воспроизведены результаты, полученные в самом начале исследования феномена «ядерной зимы» [Климатические последствия..., 1983].

*Оптические свойства дыма лесных
и городских пожаров*

Как отмечалось в первых работах по исследованию «ядерной зимы» и было четко сформулировано в первом издании SCOPE 28 «выход

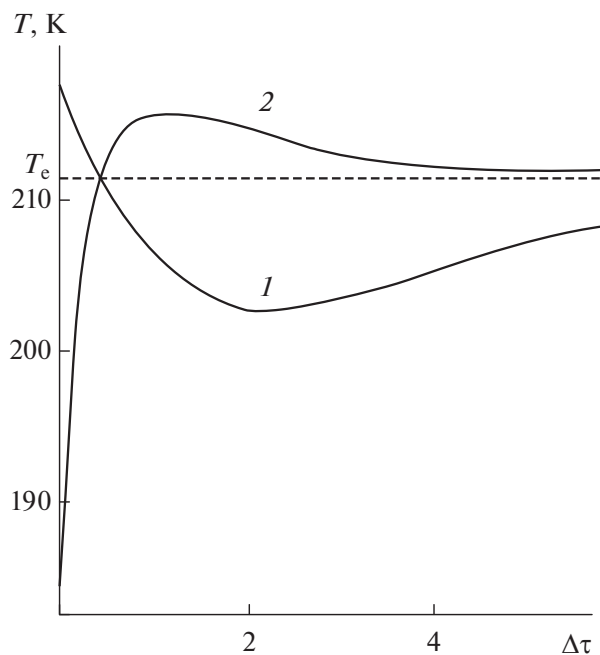


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности T_s (1) и атмосферы T_a Марса (2) от оптической толщины атмосферы в тепловом области спектра в случае глобальной пылевой бури

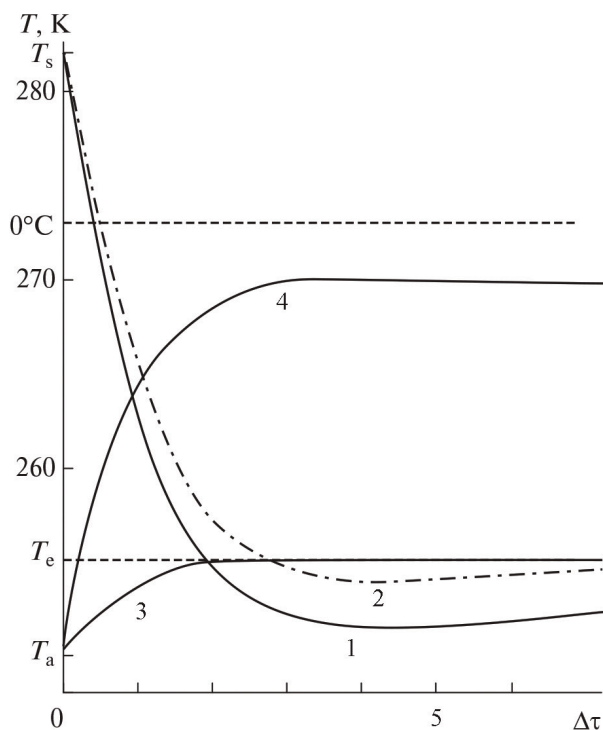


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности T_s и атмосферы T_a . Земли от оптической толщины атмосферы в тепловой области спектра в случае наступления «ядерной зимы»: суша (1), океан (2), атмосфера над сушей (3), атмосфера над океаном (4)

и свойства дыма от больших пожаров является областью наибольшей неопределенности» в оценке климатических эффектов ядерной войны [SCOPE 28, 1985]. Для уменьшения этой неопределенности по инициативе Г.С. Голицына и академика И.В. Петрянова-Соколова сотрудниками Института физики атмосферы АН СССР и Научно-исследовательского физико-химического института им. Л.Я. Карпова на Звенигородской научной станции ИФА АН СССР была создана специальная аэрозольная камера объемом 60 м^3 , с помощью которой в 1985–1986 гг. были проведены два этапа комплексного исследования микрофизических и оптических свойств дымового аэрозоля.

Результаты этого уникального проекта опубликованы в 1988 г. в специальном номере журнала «Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана» [Голицын и др., 1988; Андропова и др., 1988а; Аникин и Шукуров, 1988; Лукшин и Исаков, 1988; Исаков и др., 1988; Сидоров, 1988; Соколик, 1988; Капустин и Корнеев, 1988; Андропова и др. 1988; Вельтищев и др., 1988].

Были исследованы микрофизические и оптические свойства дымов нескольких десятков различных продуктов горения: древесины (разных видов), хлопковая ткань, шерсть, растительный жмых, торф, вата, пробка, каменный уголь, нефть, резина, каучук, эбонит, оргстекло, винипласт, полиуретан, полихлорвинил, полиэтилен, полистирол и некоторые другие. Отдельно рассматривались так называемые «городские смеси» — смеси древесины и синтетики. Дополнительно изучались оптические свойства распыленной в камере сажи, а также в лабораторных условиях — сигаретного дыма, автомобильных выхлопов, паров канифоля и др.

Исследования проводились следующим образом. Образцы исследуемого материала сжигались в электропечи, снабженной оборудованием для регулировки и контроля режима горения и пиролиза. Горение осуществлялось при температуре 900°C с продувом объема печи воздухом с расходом 8 л/мин, а пиролиз — при температуре 600°C без продува. Затем продукты горения или пиролиза поступали в камеру объемом около 60 м^3 , где измерялся спектральный ход коэффициента ослабления света в диапазоне $0.25\text{--}10.2 \text{ мкм}$, характеристики рассеяния и поляризации света. Параллельно измерялись массовая концентрация дымовых частиц, их интегральная концентрация на трассе измерения коэффициента ослабления, распределение частиц дыма по размерам. Оценивались также несферичность частиц и трансформация их свойств под влиянием влажности и коагуляции, активность частиц дыма как ядер конденсации. Дополнительно определялись химический состав и концентрация газообразных продуктов горения и пиролиза.

В ходе этого комплексного эксперимента было показано, что в зависимости от сжигаемого вещества и режима горения (открытое горение или пиролиз) очень сильно различаются не только выход дыма, но также распределение частиц дыма по размерам, форма этих частиц и их оптические свойства. Сначала участникам эксперимента казалось, что каждый дым имеет свои индивидуальные свойства и невозможно их как-то расклассифицировать. Однако сравнение измеренных оптических свойств различных дымов с результатами расчетов для модельных аэрозолей позволило понять, что для описания оптических свойств ряда дымов можно пренебречь учетом их поглощательной способности. Вероятность

выживания кванта или альbedo однократного рассеяния для таких дымов находится в пределах от 0.8 до 1, и их можно считать слабопоглощающими. Они достаточно четко делятся на грубодисперсные (размер частиц порядка 1 мкм) и мелкодисперсные с размером частиц порядка не больше 0.1 мкм. Сильнопоглощающие дымы характеризуются альbedo однократного рассеяния от 0.2 до 0.6.

Таким образом, по итогам комплексного эксперимента исследованные дымы были условно разделены на три группы: I — слабопоглощающие грубодисперсные, II — слабопоглощающие мелкодисперсные и III — сильнопоглощающие. К группе I можно отнести продукты пиролиза древесины, горения ткани и некоторых сельскохозяйственных продуктов, к группе II — продукты горения древесины, торфа, пробки, ваты, к группе III — продукты горения нефти, резины, пластических материалов. Эта классификация является достаточно условной, поскольку при различных условиях горения и пиролиза дымы одних и тех же веществ могут обладать свойствами, характерными для различных вышеуказанных групп.

Особый интерес и трудность классификации представляет так называемая городская смесь. В описываемом эксперименте эта смесь, соответствующая составу горючих веществ в городской застройке, состояла на 60% из древесины, на 20% из бумаги, на 15% из тканей и на 5% из полимерных материалов. Такая смесь, как и следовало ожидать, дает комбинацию дымов преимущественно I и II групп с бимодальным распределением частиц по размерам.

Два этапа комплексного эксперимента (1985 и 1986 гг.) позволили уверенно идентифицировать исходный горючий материал и режим образования дыма (горение или пиролиз) по данным микрофизических и оптических измерений.

Важнейшим результатом этого эксперимента для понимания потенциальных климатических эффектов пожаров гипотетической ядерной войны стало существенное уточнение соотношения оптических свойств дымового аэрозоля в видимом диапазоне солнечного света и в так называемом «окне прозрачности» для теплового излучения атмосферы и поверхности Земли. В первых работах по теории «ядерной зимы» соотношение оптических толщин слоя дымового аэрозоля в видимом τ_s и тепловом τ_t

диапазонах длин волн принималось в пределах $\tau_s/\tau_t \approx 5 \div 10$, а по данным, полученным на ЗНС ИФА, оно оказалась значительно больше $\tau_s/\tau_t \approx 20 \div 100$. Чем больше оптическая толщина для солнечного света, тем меньше его доходит до поверхности Земли, и тем холоднее она становится. Кроме того, относительно малая оптическая толщина слоя дымового аэрозоля в тепловом диапазоне позволяет тепловому излучению поверхности Земли сравнительно легко проходить сквозь атмосферу в космос и дополнительно выстуживать земную поверхность.

Потенциальный выход дыма при пожарах ядерной войны и его оптические свойства также изучались специалистами многих стран (см. [Small and Bush, 1985, Bing, 1985; Nelson, 1989] и другие работы).

При пиролизе различных веществ под воздействием ядерных взрывов выделяется большое количество сажевого аэрозоля. Его возможное распределение по высоте и потенциальные климатические эффекты описаны в препринте [Gostintsev et al., 1986], статье [Демченко и Гинзбург, 1986] и обзоре [Gotitsyn, 1986].

Природные и техногенные аналоги «ядерной зимы»

Человечество всегда сталкивается с массовыми городскими пожарами. Такие пожары обычно начинались в результате воздействия стихийных факторов, военных действий, человеческой небрежности, а иногда и злого умысла. В XX столетии человечество встретилось с новыми причинами массовых пожаров. Одна их таких причин — сильные землетрясения, которые разрушают газопроводы, вызывают короткие замыкания в электрических цепях, приводят к разливу нефтепродуктов и т.п. Особенно сильные пожары были при землетрясениях в 1906 г. в Сан-Франциско и в 1923 г. в Токио.

Массированные бомбардировки немецких и японских городов во время Второй мировой войны дают более современные аналоги пожаров ядерной войны. Во время бомбардировки Гамбурга 27 июля 1943 г. начались пожары на площади в десятки км², слившиеся в огненный смерч, дым достигал высоты 8—12 км. Высокому подъему дыма способствовало наличие благоприятных для этого метеорологических условий. Дым и пыль закрыли небо над горизонтом на 30 ч после начала пожаров.

Два массированных рейда были совершены английской и американской авиацией 13 и 14 февраля 1945 г. против Дрездена. В условиях сплошной облачности и сильных ветров в городе начались массовые пожары, продолжавшиеся около недели. На площади более 12 км² было разрушено свыше 75% построек. Пожары сопровождались образованием огненного смерча. Огненные смерчи наблюдались также при бомбардировках Касселя и Дармштадта, но во многих других городах Германии и Японии при аналогичных бомбардировках они не возникали. Последующие исследования показали, что для появления огненных смерчей нужны высокие темпы выделения тепловой энергии, определенная скорость убывания температуры с высотой (около 10°C на 1 км и не очень сильные ветры (5–10 м/с).

Бомбардировки Хиросимы и Нагасаки 6 и 9 августа 1945 г. являются единственными примерами использования ядерного оружия против городов и вообще во время войны. В Хиросиме была разрушена и выгорела дотла часть города площадью около 13 км², радиусом 2 км от эпицентра взрыва, причем возник и огненный смерч. В Нагасаки, где была сброшена более мощная бомба, выгорела меньшая площадь — 7 км²: благодаря сильно пересеченной местности значительные части города были затенены от прямой радиации и светового импульса ядерного взрыва. Все это указывает на зависимость эффектов от большого количества условий: метеорологических, топографических, характера застройки и т.п. Напомним, что при ядерных взрывах на высотах ниже 10 км от 30 до 40% энергии взрыва расходуется в виде импульса интенсивного светового и теплового излучения, от 45 до 55% энергии идет на образование ударной волны и до 15% расходуется на образование проникающей радиации и наведенной радиоактивности. Возгорание является прямым следствием воздействия светового импульса, порог возгорания сильно зависит от свойств облучаемого материала, его влажности и т.д. и находится в пределах от 20 до 60–85 Дж/см². В качестве примера укажем, что в Хиросиме предел возгорания был около 30, а в Нагасаки свыше 80 Дж/см².

Световой импульс является причиной первичных возгораний. Следующая за ним ударная волна давления может как подавлять огонь (сдувая его или покрывая горячий материал негорючими остатками зданий), так и способствовать его распространению и появлению новых очагов

путем разрушения и разбрасывания твердых горючих материалов, разрушения нефте- и газопроводов и т.д. Дальнейший подъем огненного шара приводит к захвату новых масс воздуха, что способствует распространению огня. Хотя скорость выделения энергии при пожаре Хиросимы была заметно ниже, чем при пожаре Гамбурга в 1943 г., но и в этом случае развился огненный шторм и практически все, что могло гореть, сгорело в радиусе 2 км. Можно не сомневаться, что пожары после ядерного взрыва будут более разрушительными, чем крупные исторические пожары больших городов.

Лесные пожары, вызванные ядерными взрывами, могут оказаться более интенсивными, чем обычные лесные пожары, например, из-за повала леса ударной волной. Приблизительным аналогом являются пожары, вызванные падением Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г. Его вход в атмосферу и взрыв на высоте около 8–10 км не сопровождался образованием огненного шара (интенсивность свечения в этом случае была на несколько порядков меньше, чем при взрыве ядерной бомбы), но ударная волна была такой, как при взрыве 10-мегатонной ядерной бомбы на высоте около 8 км. Повалено было около 2 тыс. км² леса, кора и сучья со многих деревьев были содраны, возникли многочисленные пожары, и полнота сгорания была гораздо большей, чем при обычных лесных пожарах в тайге. Однако площадь возгорания и степень распространения пожаров сильно зависят от сезона и погоды, будучи, естественно, наибольшими летом и в сухую погоду и наименьшими — зимой.

Количество дыма, вводимое в атмосферу, зависит от массы и природы сгораемого материала. В случае ядерной войны главными источниками дыма будут городские пожары. Количество горючих материалов колеблется в пределах от 200 кг на 1 м² в центре современного европейского города до 20 кг на 1 м² — в его пригородах. Для города с населением в 1 млн человек полный запас «топлива» оценивается от 10 до 40 Мт. Если взять сценарий войны, насчитывающий в качестве целей для ядерных ударов примерно 1000 городов (из них 200 с населением 1 млн человек и более), то «потенциальное топливо» составит примерно 10 000 Мт. Сюда же можно отнести запасы нефти, газа, угля и т.д. Детальный подсчет городского «топлива» дает 75 000 Мт, из которых 5 000 Мт — различные пластмассы, полимеры, промышлен-

ная органика и т.д. При использовании таких оценок надо помнить, что их неопределенности составляют около 50%.

Выход дыма при горении сильно зависит от условий горения. При тлении масса образующегося дыма может увеличиваться во много раз. Так, для дерева при небольших пожарах относительная масса дыма составляет 3–6% от массы сгораемого вещества, увеличиваясь до 15% при тлении; при горении нефтепродуктов, пластмасс, резины — от 1 до 15% и от 5 до 40% — при тлении. В качестве средней оценки можно принять 4%.

Лесные пожары вносят хотя и меньший, чем городские, но весьма заметный вклад в «последнее» задымление земной атмосферы. Приведем оценки выхода дыма при природных пожарах. Запас сухих горючих материалов в наиболее продуктивных лесах средних широт Северного полушария составляет 25–30 кг/м². Примерно 15–20% этого материала приходится на легко воспламеняемую, полностью сгорающую часть — мох, опад, подстилка. В малопродуктивных лесах запасы сухого материала невелики — около 1 кг/м². Средний запас сухой древесины — 15 кг/м².

По наблюдениям лесных пожаров известно, что сучья диаметром до 4 см сгорают полностью, а всего сгорает 15–20% древесины, при этом опад и подстилка, как правило, сгорают полностью. Доля выгоревшего торфа варьируется в широких пределах. Таким образом, в среднем в лесах сгорает 5–10 кг/м² горючего материала, не считая торфа.

Обычно при описании «ядерных» пожаров пожары в торфяниках не учитывают, хотя запасы горючего материала в них составляют от 0.5 до 15 кг/м². Опыт жаркого лета, например в Европейской части России в 1972 г., показывает, что в режиме тления пожары в торфяниках могут продолжаться до осенних дождей. Перечисленные выше данные о городских и лесных пожарах показывают, как трудно оценить количество дыма, поднимаемого в воздух пожарами ядерной войны.

В данной статье, посвященной преимущественно климатическим эффектам пожаров, возникающих при крупномасштабном ядерном конфликте, не обсуждаются такие климатические катастрофы, как мощнейшие извержения вулканов или падение внеземного тела (астероида) около 65 млн лет назад, которое привело к созданию пылевого облака планетарного масштаба, «астероидной ночи» и «астероидной зиме» с

похолоданием на десятки градусов. Эти эффекты были описаны в работе [Pollack et al., 1983], опубликованной в самом начале 1983 г., среди авторов которой было большинство членов группы ТТАРС. Подробно «аэрозольные» климатические катастрофы описаны, например, в [Будыко, 1985; Будыко, Голицын, Израэль, 1986].

Многие результаты исследований гипотезы «ядерной зимы» 80-х годов прошлого века нашли свое отражение как в упомянутых выше публикациях, так и в обзорах последних лет (см. например [Бреннинкмайер и др., 2021]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение хочется повторить слова Г.С. Голицына: развитие теории «ядерной зимы» — определенный прорыв в нашей области науки (физике атмосферы) [Губарев, 2001]. Важность международной научной кооперации в 80-х годах прошлого века в науке об атмосфере и климате наглядно демонстрируют совместные публикации Г.С. Голицына и других советских ученых с ведущими западными учеными [Thompson, Alexandrov, Stenchikov et al., 1984; Golitsyn and Philips, 1985; Golitsyn and MacCracken, 1987].

В последующие десятилетия развитие теории «ядерной зимы» происходило в различных направлениях, преимущественно в части исследования климатических последствий возможных региональных ядерных конфликтов и применения тактического ядерного оружия.

В настоящее время очевидно, что полученные четыре десятилетия назад научные результаты оказались существенными для предотвращения гибели человечества, для ограничения и сокращения запасов ядерного оружия.

Сегодня очень важно, чтобы все ядерные державы проводили ответственную политику в ядерной сфере, основанную в том числе и на теории «ядерной зимы», для совершенствования контроля над ядерными вооружениями и укрепления доверия между крупнейшими ядерными державами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит рецензентов и сотрудников редакции за помощь в подготовке текста статьи к печати, за доброжелательные и полезные комментарии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФА им. А.М. Обухова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров В.В., Архипов П.Л., Пархоменко В.П., Стенчиков Г.Л.* Глобальная модель системы океан — атмосфера и исследование ее чувствительности к изменению концентрации CO_2 // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 5. С. 451–458.
- Александров В.В., Стенчиков Г.Л.* Об одном вычислительном эксперименте, моделирующем климатические последствия ядерной войны // Журнал вычислительной математики и математической физике. 1984. Т. 246. С. 140–144.
- Александров В.В., Стенчиков Г.Л.* Численная оценка влияния современного тропосферного аэрозоля на климат // Докл. АН СССР. 1985. Т. 282. № 6. С. 1324–1326.
- Александров Г.А., Арманд А.Д., Свирежнев Ю.М., Тарко А.М. и др.* Математические модели экосистем. Экологические и демографические последствия ядерной войны / Под ред. А.А. Дородницына. М.: Наука, 1986. 176 с.
- Андропова А.В., Костина Е.М., Кутов А.С., Минашкин В.М., Пирогов С.М., Обвинцев Ю.И.* Оптические и микрофизические свойства аэрозолей, полученных при горении различных материалов // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24. № 3. С. 235–243.
- Андропова А.В., Шукуров А.Х., Шукурова Л.М.* О спектральном пропускании излучения пробами аэрозоля продуктов горения в диапазоне 2–20 мкм // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24. № 3. С. 290–295.
- Аникин П.П., Шукуров А.Х.* Спектральное ослабление излучения дымовым аэрозолем. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24. № 3. С. 244–249.
- Бреннинкмайер К.А.М., Гинзбург А.С., Еланский Н.Ф., Мохов И.И.* Двойной портрет: вклад Г.С. Голицына и П.И. Крутцена в исследование физики и химии атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 3–20.
- Будыко М.И.* Аэрозольные климатические катастрофы // Природа. 1985. № 6. С. 30–38.
- Будыко М.И., Голицын Г.С., Израэль Ю.А.* Глобальные климатические катастрофы / М.: Гидрометеиздат, 1986. 160 с.
- Вельтищев Н.Н., Гинзбург А.С., Голицын Г.С.* Климатические эффекты массовых пожаров // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24. № 3. С. 296–304.
- Всеобъемлющее исследование, касающееся ядерного оружия: доклад Генерального секретаря ООН / Нью-Йорк: Организация Объединенных Наций. 1981. 220 р.
- Гинзбург А.С.* О радиационном режиме поверхности и запыленной атмосферы Марса // Докл. АН СССР. 1973. Т. 208. № 2. С. 295–298.
- Гинзбург А.С.* Разноцветные планеты, хвост кометы и «ядерная зима» // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 3. С. 310–320.
- Гинзбург А.С.* Планета Земля в «послеядерную» эпоху / М.: Наука, 1988. 104 с.
- Гинзбург А.С.* Метеорологическая дальность видимости при больших аэрозольных выбросах // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 3. С. 253–268.
- Гинзбург А.С., Голицын Г.С.* Сравнительный анализ массовых природных и «ядерных» пожаров // Докл. на II Всесоюз. конф. ученых по проблемам мира и предотвращения ядерной войны. Москва, 27–29 мая 1986 г. 10 с.
- Гинзбург А.С., Самойловская Н.А.* Гипотеза «ядерной зимы» и ответственная политика в ядерной сфере // Международная аналитика. 2023. Т. 14. № 4. С. 149–160.
<https://doi.org/10.46272/2587-8476-2023-14-4-149-160>
- Гинзбург А.С., Соколик И.Н.* Пропускание и отражение света однородным слоем поглощающего аэрозоля // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 9. С. 954–959.
- Гинзбург А.С., Фейгельсон Е.М.* Некоторые закономерности лучистого теплообмена в планетных атмосферах // Изв. АН СССР. ФАО. 1971. Т. 7. № 4. С. 377–384.
- Голицын Г.С.* Последствия ядерной войны для атмосферы // Природа. 1985. № 6. С. 22–29.
- Голицын Г.С.* Советские исследования атмосферных последствий ядерной войны для атмосферы // Сборник статей «Достижения в области гидрометеорологии и контроля природной среды». Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 183–200.
- Голицын Г.С., Гинзбург А.С.* Природные аналоги ядерной катастрофы. В кн.: Климатические и биологические последствия ядерной войны. М.: Наука, 1986. С. 100–123.
- Голицын Г.С., Гинзбург А.С.* Атмосферные последствия ядерной катастрофы: поиск природных аналогов // Кибернетика, ноосфера и проблемы мира. М.: Наука, 1986. С. 47–57.
- Голицын Г.С., Шукуров А.Х.* Температурные эффекты пылевого аэрозоля на примере пыльных бурь

- Таджикистана // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297. № 6. С. 1334–1337.
- Голицын Г.С., Шукуров А.Х., Гинзбург А.С., Сутугин А.Г., Андропова А.В. Комплексное исследование микрофизических и оптических свойств дымового аэрозоля // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24. № 3. С. 227–234.
- Губарев В.С. Чаепитие в академии. Академик Г.С. Голицын: волнения моря и земли // Наука и жизнь. 2001. № 3. <https://www.nkj.ru/archive/articles/5755/>
- Демченко П.Ф., Гинзбург А.С. Влияние радиации на вертикальное развитие замутненного слоя атмосферы // Метеорология и гидрология. 1986. № 8. С. 51–57.
- Доклад Генерального секретаря ООН А/43/351. Исследование по проблеме климатических и других глобальных последствий ядерной войны. 1988. 77 с.
- Исаков А.А., Лукин В.В., Свириденков М.А. Спектро-нефелометрические исследования дымовых аэрозолей // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24. № 3. С. 258–261.
- Капустин В.Н., Корнеев А.А. Исследование процессов агрегатообразования и оптических проявлений несферичности частиц различных дымов // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24. № 3. С. 280–289.
- Климатические последствия возможного ядерного конфликта и некоторые природные аналоги (научное исследование Комитета советских ученых в защиту мира, против ядерной угрозы, авторы Голицын Г.С. и Гинзбург А.С.) / Препринт. М.: ИФА АН СССР. 1983. 24 с.
- Кондратьев К.Я., Байбаков С.Н., Никольский Г.А. Ядерная война, атмосфера и климат // Наука в СССР. 1985. №№ 2 и 3.
- Кондратьев К.Я., Никольский Г.А. Возможные экологические последствия ядерного конфликта для атмосферы и климата: Обзор / Прогр. ООН по окружающей среде (ЮНЕП), Комис. СССР по делам ЮНЕП. М.: Центр междунар. проектов ГКНТ, 1986. 48 с.
- Лукин В.В., Исаков А.А. Оптические характеристики дымовых аэрозолей // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24. № 3. С. 250–257.
- Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. М.: Наука, 1985. 272 с.
- Моисеев Н.Н. Как далеко до завтрашнего дня... Свободные размышления. 1917–1993. М.: URSS, 1994. 304 с.
- Обухов А.М., Голицын Г.С. Возможные атмосферные последствия ядерного конфликта // Вест. АН СССР. 1983. № 9. С. 57–60.
- Обухов А.М., Голицын Г.С. Возможные атмосферные последствия ядерного конфликта // Земля и Вселенная. 1983. № 6. С. 4–7.
- Обухов А.М., Голицын Г.С. Ядерная война: воздействие на атмосферу. В кн.: Мир и разоружение. М.: Наука, 1984. С. 92–102.
- Последствия ядерной войны: Физические и атмосферные эффекты. М.: Мир, 1988. 392 с.
- Софронов М.А., Вакуров А.Д. Огонь в лесу. Новосибирск: Наука, 1981. 124 с.
- Сидоров В.Н. Свойства дымовых аэрозолей по данным измерения матриц рассеяния света // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24. № 3. С. 262–273.
- Соколик И.Н. Интерпретация измерений оптических характеристик дымового аэрозоля // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24. № 3. С. 274–279.
- Стенчиков Г.Л. Климатические последствия ядерной войны: Выбросы и распространение оптически активных примесей в атмосфере // Сообщения по прикладной математике. М.: ВЦ АН СССР, 1985. 34 с.
- Стенчиков Г.Л. Численное моделирование ядерной зимы с учетом распространения аэрозоля // Докл. АН СССР. 1986. Т. 287. № 3. С. 598–602.
- Шостакович В.Б. Лесные пожары в Сибири в 1915 г. // Изв. Восточно-Сибирского отд. Российского географич. общества. 1924. Т. 47. С. 1–9.
- Alexandrov V.V., Stenchikov G.L. On the modelling of the climatic consequences of the nuclear war // Proceeding on applied mathematics. Computing center of AS USSR. 1983. 21 p.
- Batten E.S. The Effects of Nuclear War on the Weather and Climate / USA. RAND Corp. RM-4989. 1966.
- Barton I., Paltridge G.W. Twilight at noon overstated // Ambio. 1984. V. 13. № 1. P. 49–51. Reply by Crutzen P.J. Darkness after a nuclear war / Ibid. P. 52–54.
- Bing G. Estimates of total combustible material in NATO and Warsaw Pact Countries / Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-93192. 1985. USA. Livermore.
- Bolin B., Degens E.T., Kempe S. & Ketner P. (eds.) The Global Carbon Cycle. SCOPE Report 13. New Jersey: J. Wiley & Sons, 1979. 491 p.
- Bull G.A. Blue sun and moon // Meleorol. Mag. 1951. V. 80. P. 1–4.
- Cess R.D. Nuclear war: Illustrative effects of atmospheric smoke and dust upon solar radiation // Climalic Change. 1985. V. 7. P. 237–251.
- Chandler C.C., Storey T.G., Tangren C.D. Prediction of fire spread following nuclear explosions // Research paper PSW-5. 1963. Berkeley. California. 110 p.

- Cotton W.R.* Atmospheric convection and nuclear winter // Amer. Scientist. 1985. V. 73. P. 275–280.
- Covey C., Schneider S.H., Thompson S.L.* Global atmospheric effects of massive smoke injections from a nuclear war: results from general circulation model simulation // Nature. 1984. V. 308. P. 21–31.
- Crutzen P.J.* The Influence of Nitrogen Oxides on the Atmospheric Ozone Content // QJRM. 1970. V. 96. P. 320–325.
- Crutzen P.J.* Ozone Production Rates in an Oxygen-Hydrogen-Nitrogen Oxide Atmosphere // JGR. 1971. V. 76. P. 7311.
- Crutzen P.J.* SST's – a threat to the earth's ozone shield // Ambio. 1972. V. 1. P. 41–51.
- Crutzen P.J., Birks J.* The Atmosphere After a Nuclear War: Twilight at noon // Ambio. 1982. V. 11. № 2–3. P. 114–125.
- Crutzen P.J., Galbally I.E., Bruh C.* Atmospheric effects from postnuclear fires. Climatic Change. 1984. V. 6. P. 323–364.
- Ehrlich P.R. et al.* The Cold and the Dark: The World After Nuclear War // Sidgwick & Jackson. 1984. 229 p.
- Federation of American Scientist Effects of Nuclear War // J. Federation of American Scientist. 1981. V. 36. No 3.
- Fishman J., Ramanatan V., Crutzen P.J., Liu S.C.* Tropospheric ozone and climate // Nature. 1979. V. 282. P. 818.
- Foley H.M., Ruderman M.A.* Stratospheric NO_x production from past nuclear explosions // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 4441–4450.
- Ghan S.J., MacCracken M.C., Walton J.J.* Climatic response to large atmospheric smoke injections: Sensitivity studies with a tropospheric general circulation model // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P. 8315–8337.
- Ginzburg A.S.* Climate and atmospheric consequences of nuclear war // Ambio. 1989. V. 18. № 7. P. 384–390.
- Ginzburg A.* Atmospheric and climate effects of nuclear war. In: Proceedings of Europhysics Study Conference on Induced Critical Conditions in the Atmosphere. Torino, Italy, September 1989. World Scientific. P. 59–71.
- Ginsburg A.S., Golitsyn G.S., Vasiliev A.A.* Global consequences of a nuclear war: A review of recent Soviet studies // SIPRI Yearbook. 1985. P. 197–225.
- Ginzburg A.S., Samoylovskaya N.A.* The “Nuclear Winter” Hypothesis and a Responsible Nuclear Policy // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2024. <https://doi.org/10.1134/S1019331624010015>
- Glasstone S., Dolan P.* The Effects of Nuclear Weapons / US Department of Defense and US Energy Research and Development Administration. 1977. 693 p.
- Global Atmospheric Consequences of Nuclear War / Report U122878. R&D Associates, Marina del Rey, CA, March 1983. 140 p.
- Golitsyn G.S.* On the Martian dust storms // Icarus. 1973. V. 18. № 7. P. 113–119.
- Golitsyn G.S.* New development from the USSR // Environment. 1986. V. 28. № 8. P. 6 and 44.
- Golitsyn G.S., Ginsburg A.S.* Comparative estimates of climatic consequences of Martian dust storms and a possible nuclear war // Tellus. 1985. V. 37B. № 3. P. 173–181.
- Golitsyn G., Ginsburg A.* Natural analogs of a nuclear catastrophe // The night after... Climatic and biological consequences of a nuclear war. M.: Mir Publishers, 1985. P. 83–98
- Golitsyn G.S., Ginsburg A.S.* Reply to G. Visconti // Tellus. 1986. V. 38B. № 3–4. P. 302–304.
- Golitsyn G.S., MacCracken M.C.* Atmospheric and climatic consequences of a major nuclear war: Results of recent research / WCPP-142. Geneva: World Meteorological Organization, 1987. 25 p.
- Golitsyn G.S., Philips N.A.* Possible climate consequences of a major nuclear war. Report to XXXVII WMO Executive Council. WCP-113. 1985. 54 p.
- Gostintsev Yu.A., Solodovnik A.F., Vel'tishchev N.N., Ginzburg A.S., Golitsyn G.S.* Production, vertical distribution and climatic effect of soot from nuclear war blasts / Second All-Union Conference of Scientists on Problems of Peace and Prevention of Nuclear War. Moscow. 1986. 14 p.
- Haberle R.M., Ackerman T.P., Toon O.R., Hollingsworth J. L.* Global transport of atmospheric smoke following a major nuclear exchange. Ceophys. Res. Let. 1985. V. 12. P. 405–408.
- Hampson J.* Photochemical war on the atmosphere. Nature. 1974. V. 250. P. 189–191.
- Hansen J., Johnson D., Lacis A. et al.* Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide // Science. 1981. V. 213. P. 957–966.
- Hobbs. P.V., Radke. L.F., Hegg D.A.* Some aerosol and cloud physics aspects of the “Nuclear Winter” scenario. ICSU-SCOPE Workshop on “Nuclear Winter”, Supplemental Volume, Proceedings of 9th International Cloud Physics Conference. Tallinn. Estonia. USSR. 1984. P. 231–228.
- <http://climate.envsci.rutgers.edu/nuclear>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_winter
- Johnston H.S.* Expected short-term local effect of nuclear bombs on stratospheric ozone // Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 3119–3124.
- Johnston H.S., Whitten G., Birks J.* Effect of nuclear explosions on stratospheric nitric oxide and ozone // J. Geoph. Res. 1973. V. 78. P. 6107–6135.

- Kunkle T., Ristvet B.* January 2013. Castle bravo: Fifty years of legend and lore (PDF), Wikidata Q63070323.
- Kondratyev K.Ya., Ivanov V.A., Pozdniakov D.V., Prokofyev M.A.* Natural and anthropogenic aerosols: a comparative analysis / The SCOPE ENUWAR Seminar on the impact of nuclear war on climate. Leningrad. 1984 May 14–16. P. 28.
- Kondratyev K.Ya., Grigoryev A.A.* Global transport of natural and anthropogenic aerosols / The SCOPE ENUWAR Seminar on the impact of nuclear war on climate. Leningrad, 1984. May 14–16. P. 18.
- Kondratyev K.Ya., Nikolsky G.A.* A survey of possible impact of nuclear conflict on the atmosphere and climate/ The SCOPE ENUWAR Seminar on the impact of nuclear war on climate. Leningrad, 1984. May 14–16. P. 65.
- Lilejian N.M.* Effects of Superweapons Upon the Climate of the World. A Preliminary Study // ARDC report. 1952a. C2-22190. NV0400453
- Lilejian N.M.* Effects of Superweapons Upon the Climate of the World. A Second Study // 1952b. ARDC report. C2-38529. NV0400454
- Lyman H.* Smoke from Minnesota forest fires // Monthly Weather Review. 1919. V. 46. P. 506–509.
- MacCracken M.C.* Nuclear War, Preliminary Estimates of the Climatic Effects of a Nuclear Exchange // Third International Seminar on Nuclear War. 1983. Erice, Sicily. 23 p.
- MacCracken M., Golitsyn G.* Atmospheric and climatic consequences of nuclear war: results of recent research / WCP-140. WMO. Geneva. 1988. 60 p.
- Malone R.C. et al.* Nuclear winter: Three-dimensional simulations including interactive transport, scavenging, and solar heating of smoke // J. Geophys. Res., 1986 V. 91. P. 1039–1054.
- National Research Council Long-Term Worldwide Effects of Multiple Nuclear-Weapons Detonations. 1975. Washington, D.C. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/20139>
- Nelson J.* Fractality of sooty smoke: Implications for the severity of nuclear winter // Nature. 1989. V. 339. P. 611–613.
- Obukhov A.* The Earth's atmosphere: Catastrophe after a nuclear strike / The night after... Climatic and biological consequences of a nuclear war. M.: Mir Publishers, 1985. P. 145–147.
- Office of Technology Assessment (ODA) of the Congress of the United States. The Effects of Nuclear War. Washington DC. 1979. 151 p.
- Penner J.* Uncertainties in the smoke source term for 'nuclear winter' studies // Nature. 1986. V. 324. P. 222–226.
- Pittock A.B., Walsh K., Frederiksen J.S.* General circulation model simulation of mild nuclear winter effects // Clim. Dyn. 1989. V. 3. P. 191–206.
- Plummer F.G.* Forest Fires // US Department Agriculture Forest Service Bulletin. 1912. V. 117. P. 15–22.
- Pollack J.B., Toon O.B., Ackerman T.R., McKay G.P., Turco R.P.* Environmental effects of an impact generated dust clouds implications for the Cretaceous-Tertiary extinctions // Science. 1983. V. 219. P. 287–289.
- Ramaswamy V., Kiehl J.T.* Sensitivity of the Radioactive Forcing Due to Large Loadings of Smoke and Dust Aerosols // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 5597–5613.
- Reinsel G.C.* Analysis of total ozone data for the detection of recent trends and the effects of nuclear testing during the 1960's // Geophys. Res. Lett. 1981. V. 8. № 12. P. 1227–1230.
- Robock A.* Snow and ice feedbacks for prolonged effects of nuclear winter // Nature. 1984. V. 310. P. 667–670.
- Robock A., Zambri B.* Did Smoke from City Fires in World War II Cause Global Cooling? // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. V. 123. № 18. P. 10314–10325.
- Sagan C., Ehrlich P.R., Kennedy D., Roberts W.O.* The Cold and the Dark: The World After Nuclear War / W.W. Norton & Co. 1984. NY. USA. 229 p.
- SCOPE 28: Environmental Consequences of Nuclear War. V. 1. Physical and Atmospheric Effects / Eds.: Pittock A.B., Ackerman T.P., Crutzen P.J., MacCracken M.C., Shapiro C.S., Turco R.P. Wiley. UK. 1985. 350 p.
- SCOPE 28: Environmental Consequences of Nuclear War. V. 1. Physical and Atmospheric Effects. Second Edition / Eds.: Pittock A.B., Ackerman T.P., Crutzen P.J., MacCracken M.C., Shapiro C.S., Turco R.P. Wiley. UK. 1989. 360 p.
- Schneider S.H., Thompson S.L.* Simulating the climatic effects of nuclear war // Nature. 1988. V. 333. P. 221–227.
- Seiler W., Crutzen P.J.* Estimates of gross and net fluxes of carbon between biosphere and atmosphere from biomass burning // Climatic change. 1980. V. 2. P. 207–247.
- Shostakovitch V.B.* Forest conflagrations in Siberia with special reference to the fires of 1915 // J. Forestry. 1925. V. 23. № 4. P. 365–374.
- Smith C.D. Jr.* The destructive storm of November 25–27, 1950 // Monthly Weather Review. 1950. V. 78. P. 204–209.
- Small R.D., Bush B.W.* Smoke production from multiple nuclear explosions in non-urban areas // Science. 1985. V. 229. P. 465–469.
- Stenchikov G.L., Carl P.* Climate consequences of nuclear war: sensitivity against large-scale inhomogeneities in the initial atmospheric pollutions // GDR Academy of sciences. Berlin. 1985. 96 p.

- Stenchikov G., Carl P.* First acute phase stress matrix calculations using the CCAS tropospheric general circulation model // SCOPE – ENUWAR Moscow Workshop, 1988.
- Stenke A., Hoyle C.R., Luo B., Rozanov E., Gröbner J., Maag L., Brönnimann S., Peter T.* Climate and chemistry effects of a regional scale nuclear conflict // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 9713–9729. <https://doi.org/10.5194/acp-13-9713-2013>
- Teller E.* Widespread after-effects of nuclear war // Nature. 1984. V. 310. P. 621–624.
- Thompson S.L.* Global interactive transport simulations of nuclear war smoke // Nature. 1985. V. 317. P. 35–39.
- Thompson S.L., Alexandrov V.V., Stenchikov G.L. et al.* Global climate consequences of nuclear war: calculations with three-dimensional models // Ambio. 1984. V. 13. № 1. P. 236–243.
- Toon O.B., Pollack J.B., Ackerman T.P. et al.* Evolution of an impact-generated dust cloud and its effects on the atmosphere // Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 1982. № 190. P. 187–200.
- Turco R.P., Golitsyn G.S.* Global Effects of Nuclear War // Environment. 1988. V. 30. № 5. P. 8–16.
- Turco R.P., Toon O.B., Pollack J.B., Sagan C.* Consequences of nuclear «warfare» // EOS. Transactions American Geophysical Union Fall Meeting Abstracts. 1982. V. 63. № 45. P. 1018.
- Turco R.P., Toon O.B., Ackerman T.P., Pollack J.B., Sagan C.* (TTAPS) Nuclear winter: Global consequences of multiple nuclear explosions // Science. 1983a. V. 222. P. 1283–1292.
- Turco R.P., Toon O.B., Ackerman T.P., Pollack J.B., Sagan C.* (TTAPS) Global Atmospheric Consequences of Nuclear War / Rep. U 122878. R&D Associates, Marina del Rey, CA, March 1983b. 144 p.
- Turco R.P., Toon O.B., Ackerman T.P., Pollack J.B., Sagan C.* (TTAPS) Climate and smoke: an appraisal of nuclear winter // Science. 1990. V. 247. P. 166–176.
- Turco R.P., Toon O.B., Ackerman T.P., Pollack J.B., Sagan C.* (TTAPS) Nuclear Winter: Physics and Physical Mechanisms // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1991. V. 19. P. 383–422. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.19.050191.002123>
- United Nations Secretary General Effects of the possible use of nuclear weapons and the security and economic implications for states of the acquisition and further development of these weapons / PRISM: Political & Rights Issues & Social Movements. 1968. 694 p. (<https://stars.library.ucf.edu/prism/694>).
- Ward D.E., MacMahon E.K., Johansen R.W.* An update on particulate emissions from forest fires // Transactions of the 69th annual meeting of the Air Pollution Control Association. 1976. 15 p.
- Wexler H.* The Great Smoke Pall — September 24–30, 1950 // Weatherwise, 1950. № 6. P. 129–142. <https://doi.org/10.1080/00431672.1950.9927067>
- Whitten R.C., Borucki W.J., Turco R.P.* Possible ozone depletions following nuclear explosions // Nature. 1976. V. 257. P. 38–39.

THE “NUCLEAR WINTER” THEORY DEVELOPMENT IN THE WORKS OF G.S. GOLITSYN AND HIS COLLEAGUES IN THE 80S OF THE XX CENTURY

© 2025 A. S. Ginzburg

Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhevsky per., 3, bld. 1, Moscow, 119017 Russia

e-mail: gin@ifaran.ru

The article presents the author's version of the history of research on the hypothesis of a “nuclear winter” — a catastrophic change in the Earth's climate in the case of large-scale use of nuclear weapons and the key role of academician G.S. Golitsyn in these studies. Special attention is paid to the emergence of the “nuclear winter” hypothesis prehistory and the scientific breakthrough of the 80s of the XX century, when scientists from the USSR, the USA and other countries tried to comprehend the theoretical possibility of a sharp cooling in most of the Earth's land as a result of massive fires of nuclear war and find natural analogues at many scientific meetings and in many scientific and popular publications related to such a “man-made” climate disaster.

Keywords: nuclear threat, nuclear war fires and smoke, «nuclear winter», climate models, natural analogues