

Моделирование последствий ядерной войны как фактор стратегического сдерживания потенциальных агрессоров

Тарко Александр Михайлович

E-mail: tarko@bmail.ru

Моделирование последствий ядерной войны как фактор стратегического сдерживания потенциальных агрессоров

А.М. Тарко

Доктор физико-математических наук, профессор Главный научный сотрудник Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 14-01-00308 Аннотация Прогнозы ядерной зимы были получены одновременно и независимо учеными СССР и США в 1983-1985 гг. Изложена история разработки, даны результаты прогнозов полученных в СССР климатических и некоторых экологических ее последствий. Согласно принятому сценарию, возникновение ядерной зимы происходит в результате крупномасштабной ядерной войны между двумя крупнейшими странами (суммарная мощность ядерных взрывов равна 10000 Мт). Главным действующим фактором являются возникшие мощные пожары в крупных городах, перешедшие в «огненные смерчи». Образовавшиеся сажа и мелкодисперсная пыль перекрывают солнечное излучение. В атмосфере существуют механизмы, препятствующие опаданию ядерных аэрозолей в течение длительного времени. Согласно расчетам ядерный аэрозоль за две недели покрывает Северное полушарие Земли, за два месяца Южное. Величина понижения температуры в разных точках земной поверхности составляет от 5 до 60 градусов С. Длительности процесса – до года. Согласно расчетам, та страна, которая начнет ядерную войну, неминуемо погибнет от последствий своих или чужих ядерных ударов. Растительность и животный мир погибает в зависимости от того, в какой период года происходит ядерный конфликт. Наиболее опасным является, когда он начинается летом, когда растения в наименьшей степени выносят уменьшение температуры и снижение освещенности. Также проведены расчеты ядерной зимы при меньшей суммарной мощности ядерных взрывов - 100 Мт. При этом ядерная зима будет сопровождаться почти таким же падением температуры, но на более короткое время – три месяца.

Ключевые слова: прогнозы ядерной зимы, модели глобального климата и биосферных процессов.

Введение В течение десятилетий, прошедших после окончания II Мировой войны, военная напряженность в мире, испытывая колебания, в целом постоянно усиливается. Этому способствовали и годы Холодной войны, и появившийся мощный международный терроризм. Некоторое снижение напряженности происходило в результате заключения нескольких договоров об ограничении стратегических наступательных вооружений и систем противоздушной обороны. Важнейшим фактором снижения военной напряженности является улучшение доверия между сторонами. Однако в настоящее время это не происходит. Терроризм усиливается в мире, и ожидать его уменьшения и связанной с ним военной напряженности пока можно только в политологических статьях. Весьма важным фактором постоянного роста напряженности является совершенствование систем наступательных и оборонительных вооружений. Совершенствуются системы ядерного оружия и военные доктрины их применения. Появляются системы вооружений, превосходящие по ряду параметров разрушительности возможности ядерного оружия. Нет сомнений, что даже если исчезнут все другие факторы роста напряженности, то совершенствование вооружений

будет оставаться постоянным фактором напряженности. Примером здесь является сохранение, а иногда усиление психологической напряженности, связанной со строительством и эксплуатацией все более надежных мирных атомных электростанций. В глобальном плане важным фактором, повлиявшим на развитие военных доктрин, а, главное, приведшим к снижению военной напряженности было открытие в 1983-1985 годах учеными СССР и США эффекта «ядерной зимы». Эти результаты стали новым и неожиданным фактором стратегического сдерживания в мировой практике. Важно, что результаты были получены одновременно и независимо учеными СССР и США. Однако, если про «ядерную зиму», благодаря усилиям ученых, публикациям прессы и государственным средствам пропаганды об этом узнало практически все население стран развитого мира, то, к сожалению, руководство в СССР ограничилось короткими заметками о международных конференциях в центральной прессе. Научные результаты Советских ученых о «ядерной зиме» были изданы малыми тиражами, они были доступны малому количеству не только населения страны, но и ученых. Популярных книг не было выпущено совсем. В докладе словами одного из участников моделирования изложены ставшие историческими важнейшие результаты расчетов последствий крупномасштабной ядерной войны как о постоянном факторе стратегического сдерживания, актуальность и значимость которого для поддержания мира с годами только увеличивается. Почти 35 лет назад, в 1983-1985 годах, одновременно и независимо учеными СССР и США были сделаны прогнозы ядерной зимы. Эти прогнозы имели огромное значение для детального представления человечеством, во-первых, о том, что мир, может быть легко разрушен, и это будет глобальная катастрофа, а во-вторых, что его можно и нужно сохранить, и это реально достижимо. Тогда в результате разработки прогнозов ядерной зимы люди поняли, что развязывание крупномасштабной ядерной войны недопустимо – это приведет цивилизацию к разрушению, а наличие большого количества ядерного оружия у двух сильнейших ядерных стран является не только фактором агрессии, но и сдерживающим фактором, обеспечивающим человечеству жизнь без мировых войн. Весьма важно, что усилия «обычных» ученых СССР и США дали то, чего не смогли получить специальные службы в обеих странах, призванные обеспечить правительства необходимыми знаниями, это был их «недосмотр». В настоящее время, когда фундаментальная наука во всех развитых странах активно развивается, а в России – уничтожается, прорыв в науке, сделанный в то время, напоминает нам, что когда-то в двух сильнейших странах был относительный паритет не только по наступательным вооружениям, но и по уровню фундаментальной науки и ее прикладным результатам, каким являлись результаты моделирования ядерной зимы.

История В начале 80-х годов П. Крутцен и Дж. Биркс обратили внимание на то, что во II мировой войне в результате ковровых бомбардировок американской авиацией немецких городов Гамбург, Дрезден, Кассель и Дармштадт возникали масштабные пожары, в которых образовывались крупные восходящие потоки воздуха – «огненные штормы». Они выдвинули идею, что в результате ядерных бомбардировок крупных городов может быть превышена некая критическая масса возникших пожаров, и тогда они станут гигантскими, будет гореть все, высоко в атмосферу взлетят гигантские массы дыма и сажи, которые, распространившись на огромные расстояния, перекроют солнечное излучение, и температура атмосферы значительно уменьшится. Этот эффект они назвали «ядерная зима». В начале 1983 г. группа крупных ученых-климатологов собралась вместе, они согласовали совместный сценарий, определяющий, сколько продуктов горения будет распылено в атмосфере, на какую высоту, какие размеры частиц и т.п. Среди них был и мой коллега – сотрудник ВЦ АН СССР В.В. Александров К осени вычисления были закончены, и оказалось, что результаты в значительной степени совпали - падение температуры по прогнозам должно было составить около 20-30 градусов, что потрясло всех. Так начались

ставшие всемирно известными работы по прогнозированию ядерной зимы. То, что среди американских ученых был один советский, не было случайностью. Возможность такого сотрудничества была достигнута в результате инициативы академика Никиты Николаевича Моисеева. В конце 70-х он основал в Вычислительном центре АН СССР два подразделения для изучения и моделирования глобальных биосферных процессов биосферы. Одно было призвано моделировать климатические процессы, другое – экологические. К началу 80-х годов В.В. Александровым и его коллегами была разработана математическая модель климата Земли самого сложного типа – модель общей циркуляции атмосферы и океана, позволяющая рассчитывать изменения климата на всей поверхности Земли и на разных высотах [1]. К этому же времени А.М. Тарко разработал экологическую модель – модель биогеохимического цикла двуокиси углерода в биосфере – также с пространственным разбиением [10]. Обе модели были единственными в стране, на которых можно было рассчитывать долгосрочные прогнозы с учетом пространственного разбиения суши и океана. Только эти модели позволяли быть на равных с учеными США в этой области. Сейчас можно понять, что если бы работы по ядерной зиме были бы выполнены только в США, то можно не сомневаться, что в этом случае они не получили бы значения и грандиозного мирового резонанса. Н.Н. Моисеев, В.В. Александров и А.М. Тарко в сентябре 1983 года были на симпозиуме «Коэволюция человека и биосферы» Института жизни в Хельсинки. На этом симпозиуме собрались крупные специалисты в области проблем будущего человечества и биосферы – экономисты, экологи, философы, математики – специалисты из США, Канады, Франции, Швеции, Финляндии, СССР. Перед началом симпозиума В.В. Александров показал Н.Н. Моисееву листок бумаги с графиком падения температуры при ядерной зиме, тот был потрясен. На этом симпозиуме состоялось его первое выступление о результатах ядерной зимы. Оно оказало неожиданно сильное впечатление на участников. Все были поражены. Так, после выступления В.В. Александрова академик фон Рихт, философ и старейшина финских ученых, пожилой человек, сказал А.М. Тарко: «Я прошел всю войну, но никогда мне не было так страшно». Организацию работ по ядерной зиме взяла на себя организация СКОПЕ – Научный комитет по проблемам окружающей среды. Это известная неправительственная некоммерческая организация со штаб-квартирой в Париже (Франция), успешно работающая по сей день. Она дала ученым возможность собираться вместе на нескольких рабочих совещаниях, привлечь недостающих специалистов. Ею были опубликованы два тома «Последствия ядерной войны» и популярная книга. Первый том был посвящен климатическим последствиям [8], второй – экологическим и сельскохозяйственным [9]. Оба тома вскоре были переведены на русский язык. В СССР вышли две книги – в первой [4] одна глава содержала результаты В.В. Александрова по моделированию ядерной зимы (его докторская диссертация), во второй [2] были опубликованы результаты экологических, демографических и сельскохозяйственных прогнозов ядерной зимы, выполненные под руководством Ю.М. Свиричева и А.М. Тарко. Также был выпуск ВЦ АН СССР, в котором была статья В.В. Александрова и Г.Л. Стенчикова [6], с немного более поздними расчетами климатических последствий ядерной зимы. Деятельностью в СКОПЕ отнюдь не ограничивалась работа ученых по распространению знания о ядерной зиме. Необыкновенно известной фигурой стал советский ученый В.В. Александров. Его приглашали на множество различных конференций, симпозиумов и других мероприятия. Так, Палская академия наук пригласила ученых из США и СССР на совместное заседание, на котором были академик Е.П. Велихов и В.В. Александров. Автор данной статьи хорошо помнит фотографии, на которых были засняты все присутствующие ученые, фотографию личной встречи Папы Иоанна Павла II и В.В. Александрова (Фотографию выступления В.В. Александрова на симпозиуме Института жизни и в Финляндии и копию фотографии встречи Папы Иоанна Павла II и В.В.

Александрова можно увидеть в виртуальном музее академика Н.Н. Моисеева, созданном А.М. Тарко: http://www.ccas.ru/manbios/mois_r.html).....()

Климатические последствия крупномасштабной ядерной войны (ядерная зима) При анализе возможных климатических последствий крупномасштабной ядерной войны [2, 4] исследователи исходили из сценария, опубликованного в двойном выпуске журнала АМБИО [7]. Авторы сценария предполагали, что ядерный конфликт будет происходить между двумя основными противоборствующими сторонами и что ядерные удары будут нанесены практически мгновенно. В войне будет использовано менее половины суммарного ядерного арсенала СССР и США. Общий запас ядерных зарядов, израсходованных с обеих сторон, составит 5742 Мт. Ударам подвергнется вся Европа, СССР, Северная Америка и район Дальнего Востока, включающий Японию и Южную Корею. Предполагается, что будут нанесены удары и по странам, непосредственно не участвующим в войне, с целью подрыва их экономического потенциала и уменьшения их значения в послевоенной ситуации. Крупные города являются первоочередными целями, утвержденными стратегическими планировщиками в ядерных атаках промышленных объектов, составляющих важнейшую часть оборонного и экономического потенциала противника. Возникающие в городах очаги пламени («первичные пожары») вызывают обширные «вторичные» пожары. Тогда множество очагов пламени тех и других пожаров объединится в один мощный очаг, и образуется «огненный смерч», способный уничтожить целый город (как это и случилось после бомбардировок американской авиацией Дрездена и Гамбурга в конце второй мировой войны). Интенсивное выделение тепловой энергии в центре такого гигантского пожара поднимает вверх огромные массы воздуха, создавая в то же время ветры ураганной силы у поверхности земли, которые подают все новые порции кислорода к очагу пожара. Именно в результате «огненного смерча», дым, пыль и сажа, поднимающиеся вверх вплоть до стратосферы, образуют черную тучу, практически полностью закрывающую солнечный свет, наступает «ядерная ночь». Расчеты показывают, что время пребывания аэрозоля в атмосфере, по сравнению с предыдущими представлениями, будет значительно увеличено в силу следующих факторов. Черный слой сажи будет интенсивно нагреваться солнечными лучами и подниматься вверх вместе с нагретыми от него массами воздуха. Конвективные процессы (т. е. режим испарения влаги и выпадения осадков) будут существенно подавлены, осадки уменьшатся, а с ними и вымывание аэрозоля. Все это приведет к значительному удлинению длительности ядерной зимы. Аэрозоль, как дымная пелена, за две недели распространится по Северному полушарию, а за два месяца – из Северного полушария в Южное. В какой бы стране ни взорвались бомбы - все перемешается. Лучи Солнца не будут доходить до поверхности Земли, и температура воздуха в разных местах упадет на 10 – 30 °С. Через год этот аэрозоль должен все-таки осесть на поверхность. К такому выводу пришли Владимир Александров и его коллеги, работавшие под руководством академика Никиты Николаевича Моисеева в Вычислительном центре АН СССР. Отметим, что в Южном полушарии будет также значительное снижение температуры атмосферы. Расчеты показывают, - что пыль и дым и темнота распространятся на тропики и большую часть Южного полушария. Таким образом, даже невоюющие страны, включая находящиеся вдалеке от района конфликта, будут испытывать его губительное воздействие. Такие страны, как Индия, Бразилия, Нигерия или Индонезия могут быть разрушены в результате ядерной войны, несмотря на то, что на их территории не разорвется ни одна боеголовка. Ядерная зима означает существенное усиление масштабов страданий для человечества, включая нации и регионы, не вовлеченные непосредственно в ядерную войну. Указанные расчеты ядерной зимы были получены на основе сценария крупномасштабной ядерной войны. Однако были проведены и другие расчеты. Они основаны на сценарии, согласно которому в войне будет использовано «всего» 100 Мт ядерного

арсенала (столько в то время могла нести и быстро выпустить американская подводная лодка), но при условии, что все заряды будут направлены на крупные города. При этом оказалось, что ядерная зима, почти такой же силы также возникнет. Она продлится более короткое время – около двух–трех месяцев – но этого достаточно для уничтожения значительного процента живого на Земле. Выявленная нечувствительность эффекта ядерной зимы от количества использованного ядерного оружия означает недопустимость не только крупномасштабной, но и т.н. ограниченной ядерной войны.

Экологические последствия крупномасштабной ядерной войны. Прогнозы гибели растительности в результате действия ядерной зимы. В СССР оценка экологических последствий крупномасштабной ядерной войны была проведена на основе климатических расчетов В.В. Александрова, ее сделала группа ученых из разных организаций под руководством Ю.М. Свирижева и А.М. Тарко [2]. Здесь приводятся результаты воздействия факторов падения температуры и уменьшения освещенности на растительный и животный мир [2]. Эти результаты были получены А.М. Тарко совместно с Н.Ф. Писаренко и А.Д. Арманом. Экологическое воздействие факторов «ядерная зима» и «ядерная ночь» на экосистемы – наиболее трудно поддающийся оценке фактор ядерной войны. Если действие такого фактора, как радиация, можно оценить по результатам уже проведенных испытаний ядерного оружия, то ядерная зима не встречались в истории биосферы. Мы сначала рассмотрим некоторые общие аспекты воздействия низких температур и низкой освещенности на экосистемы, а затем для получения оценок используем имеющуюся информацию по действию факторов, близких к факторам ядерной зимы. Для оценки падения температуры и освещенности при ядерной зиме использованы результаты расчетов по модели общей циркуляции атмосферы и океана ВЦ АН СССР [6]. Почти полное блокирование солнечного излучения ядерным аэрозолем приводит к быстрому падению температуры поверхности материков в Северном полушарии. В течение 15 дней температура нижних слоев воздуха падает на 10-50° С, а затем начинает медленно расти. В тропиках температура через месяц падает до 0° С. За три месяца волна загрязнения докатывается до Антарктиды. Долговременное падение температуры в Южном полушарии в среднем составляет 5-8° С. Охлаждение южных океанов изменяет динамику ядерной зимы и увеличивает продолжительность похолодания. Через три месяца после начала ядерного конфликта верхние слои воздуха над Антарктидой замутятся. Вслед за облаками сажи на материке Южного полушария распространится ядерная зима. Вплоть до 30° ю.ш. температура воздуха над материками упадет на 1-4° С. Через год все климатические факторы приблизятся к норме. Есть два фактора действия ядерной зимы на растительность. Первый – это похолодание, второй – снижение освещенности. Рассмотрим действие обоих факторов на растения. Растения можно разделить на чувствительные к холоду и чувствительные к морозу. Чувствительные к холоду растения гибнут или получают повреждения при температуре выше 0° С, а чувствительные к морозу – ниже 0° С. Первопричиной гибели растений, чувствительных к холоду является переход клеточных мембран из преимущественно жидкокристаллического состояния в состояние геля вследствие затвердевания липидов мембран. Причиной гибели растений, чувствительных к морозу, является образование льда внутри клеток или образование льда в межклеточном пространстве. Холодостойкость и морозостойкость не являются постоянными свойствами растений, а в соответствии с генотипом формируются в процессе онтогенеза под влиянием условий внешней среды. Морозостойкость резко меняется в течение года. Она минимальна летом и максимальна зимой. Чтобы стать морозостойким, согласно И.И. Туманову [5], растения должны пройти последовательно три этапа подготовки: войти в состояние физиологического покоя, пройти первую, а затем вторую фазу закалывания. Высокая морозостойкость у растений формируется не сразу, она повышается поэтапно: сначала при

вхождении в период покоя после окончания вегетационного сезона, затем при закаливании и, наконец, в результате медленного и постепенного нарастания морозов во второй фазе закаливания. Максимальная морозостойкость достигается в наиболее суровое время года. Каждый из этих этапов является подготовительным для прохождения последующего. Если какое-либо звено в такой длительной (несколько месяцев) подготовке растений к зиме выпадает или пройдет неудовлетворительно, то растение окажется не в состоянии приобрести необходимую морозостойкость. Например, из-за летней засухи плодовые насаждения часто не успевают нормально закончить вегетацию. Поэтому они не успевают подготовиться к зиме и погибают при таких морозах, которые при благоприятных летних условиях выдерживают без труда. Сибирская пихта выдерживает морозы до -60°C вблизи полюса холода в Сибири, образуя там обширные леса, и подмерзает на берегах Рейна в теплом климате Центральной Европы. В процессе эволюции растения приспособились к смене времен года и связанным с этим понижением температуры воздуха или наступлением засушливого сезона. У многолетних растений при переходе в состояние покоя почти прекращается рост и начинается интенсивное накопление сахаров, а затем полностью или почти полностью прекращается фотосинтез, опадают листья у лиственных растений. В процессе закалки в клетках растений активно накапливаются защитные вещества (криопротекторы) в виде сахаров, водорастворимых белков, органических кислот, а также повышается насыщенность липидов [3], происходят сложные конформационные изменения белков. У древесных растений отмечено существенное (до 40-50%) для перехода растений в состояние покоя необходим достаточный уровень освещенности на начальном этапе этого процесса. Все процессы, связанные с переходом в состояние покоя, требуют определенных затрат энергии. Источником этой энергии являются ассимиляты, образующиеся при фотосинтезе. Переход в состояние покоя начинается с того, что рост растения прекращается, а ассимиляты начинают накапливаться в виде сахаров — мобильных источников энергии. Поэтому, если освещенность в начале перехода в состояние покоя будет низкой, то растения не получат достаточного количества энергии для необходимых перестроек. При значительном снижении освещенности (в 20-100 раз по сравнению со значением освещенности насыщения фотосинтеза) поступление энергии снижается настолько, что не покрывает затрат на дыхание, и чистый фотосинтез становится равным нулю. Эта так называемая компенсационная интенсивность освещенности различна у разных видов растений и тем меньше, чем меньше температура воздуха. Если освещенность падает ниже значения, то растение может погибнуть. Растения одного вида в одном фитоценозе по-разному переносят действие низких температур и освещенностей. Ослабленные деревья, старые и совсем молодые переносят действие этих факторов хуже, чем остальные. Поэтому если действует низкая температура или освещенность, которая не достигает предельных значений для гибели большинства растений, то некоторая часть растений все равно погибнет. Процент гибели растений будет тем больше, чем ближе к предельным значениям температура или освещенность. Мы рассмотрим два крайних случая. Первый — когда ядерный конфликт происходит в июле, второй — в январе. Абсолютные значения температуры воздуха у подстилающей поверхности для разных участков Земли получены путем вычитания рассчитанной величины падения температуры из стандартных средних летних значений для случая, если ядерная война началась летом. Аналогично для случая, если она началась зимой. Июль — самый теплый месяц в Северном полушарии. Согласно используемым нами расчетам через 15 суток после распространения загрязнения в Северном полушарии температура воздуха у поверхности суши почти во всем Северном полушарии станет ниже нуля. Нулевая изотерма пройдет через экватор. На 9-й день после распространения загрязнений освещенность севернее 18° с.ш. будет меньше $3,6 \cdot 10^{-5}$ Вт/м². Данная освещенность в $(3-80) \cdot 10^4$ раз меньше компенсационной освещенности растений, измеренной при нор-

мальной температуре. Можно считать, что поступление энергии в растения прекратится. Успеют ли растения приспособиться к низким температурам? Можно утверждать, что нет. Для растений северной и средней полосы в обычных условиях окончания сезона вегетации время перехода в состояние покоя больше двух недель. Основным фактором, вызывающим начало перехода в состояние покоя, является сокращение длины светового дня. В меньшей степени влияет уменьшение температуры воздуха. От начала действия этого фактора до начала перехода в режим запасания сахаров проходит минимум 3—5 дней. Если за это время в условиях начинающейся ядерной зимы запуск механизма перехода в состояние покоя произойдет, то в связи с быстрым и сильным уменьшением освещенности растения не успеют накопить достаточного количества ассимилятов (будет накоплено не более 10). Аналогично, не успеют перейти в состояние покоя и погибнут в условиях низких температур и отсутствия света субтропические растения. Вымерзнут растения, у которых переход в состояние покоя происходит в связи с наступлением сухого периода. В тропических влажных лесах освещенность будет выше компенсационной (70 Вт/м² на 40-й день и 50 Вт/м² на 99-й день после начала ядерной войны), но поскольку растения этих лесов не обладают способностью переходить в состояние покоя и закаливаться, то они погибнут от действия низких температур. В Южном полушарии в июле — зима, падение температуры составит для широтной зоны (0-12)[°] ю.ш. (1—4)[°] С, а освещенность — 30. Вместо погибших растений получат преимущество теневыносливые растения. Эти растения будут препятствовать росту молодых светолюбивых растений, находящихся под их пологом. Молодые светолюбивые растения погибнут из-за затенения теневыносливыми. Учитывая соотношение светолюбивых и теневыносливых растений в тропических лесах, мы получим, что в целом погибнет около 50%. Во всех зонах семена растений сохранятся. Прорастание упавших в землю семян происходит в течение нескольких лет. Поэтому после окончания ядерной зимы созревшие и попавшие в землю до ее наступления семена смогут в течение нескольких лет прорасти. Однако около 15-20%. Таким образом, если ядерная война начнется в июле, то вся растительность Северного полушария погибнет, а в Южном погибнет частично. Гибель животных в Северном полушарии в данных обстоятельствах будет определяться недостатком пищи и сложностью ее поиска в условиях ядерной ночи. В тропических и субтропических районах важным фактором будет холод. Погибнут многие виды млекопитающих, все птицы, рептилии смогут сохраниться. Январь — самый холодный месяц в Северном полушарии. Растения северной и средней полосы находятся в это время в состоянии покоя. Поэтому переносимость ими ядерной зимы будет определяться величиной морозов. Наибольшее падение температуры будет в широтной полосе 12-36° с.ш. — до 54° С. Абсолютные значения температуры в этой зоне будут (-6)-(-42)[°] С. Падение температуры на Крайнем Севере в полосе 48-62° с.ш. составит 11-38° С. При этом абсолютные значения температуры будут (-15)-(-72)[°] С. Рассмотрим действие ядерной зимы в этом случае отдельно на разные типы растительности. Будем придерживаться биогеографического принципа рассмотрения. 1. Тундра, лесотундра, таежные леса, широколиственные леса. Для оценки способности данных растений переносить морозы были сопоставлены распределения отдельных пород деревьев и средние абсолютные минимумы температур. Анализ этих данных позволил оценить минимальные температуры, которые способны переносить деревья. Для каждого участка суши, сравнивая обычные температуры зимой, температуры во время ядерной зимы, соотношение пород деревьев и используя данные наблюдений гибели деревьев в аномальные зимы, можно было оценить процент гибели деревьев. Эта процедура осуществлялась экспертным методом. Были сопоставлены процент гибели растений в обычные зимы, соответствующий средним многолетним условиям, и процент гибели растений в аномальные зимы с длительными морозами. Данные о проценте гибели растений под действием морозов ядерной зимы были получены путем линейной

экстраполяции вышеприведенных чисел. Оказалось, что в связи с разными значениями температур в обычную зиму и разным падением температуры при ядерной зиме степень гибели одних и тех же растений в Европе, Сибири и Северной Америке будет различной.

2. Степи. Холода в зоне степей приведут к гибели надземной части растений и к почти полному вымерзанию их корневой системы. Морозостойкость надземной части травянистых растений составляет в зоне степей (-11) - $(-20)^{\circ}\text{C}$, а температура в ядерную зиму здесь будет (-23) - $(-30)^{\circ}\text{C}$. В течение нескольких месяцев возможно выживание ряда луковичных растений. Погибнет около 903. Высокогорные пустыни, альпийские, субальпийские луга. Тип горной растительности приспособлен переносить значительные низкие температуры. Поэтому растения частично смогут выдержать ядерную зиму. Погибнет около 754. Тропические и субтропические леса, саванны. Переносимость данной растительностью факторов ядерной зимы будет такой же, как и в случае, когда ядерный конфликт произойдет в июле. Поэтому гибель данных видов растений также будет полной.

5. Растительность Южного полушария. В январе в Южном полушарии — лето. Переносимость растениями экваториальной зоны факторов ядерной зимы будет незначительно отличаться от переносимости в случае, если ядерная война начнется в июле. Это объясняется тем, что в тропической зоне различие температур зимы и лета невелико. В более южной части полушария изменение температуры и освещенности будет слабым и влияние факторов ядерной зимы будет незначительным.

6. Гибель агроэкосистем. В данной ситуации можно говорить о возможности выживания озимых культур. Все остальные зимующие агроценозы (плодовые растения и др.), как показывают результаты сравнения морозостойкости и абсолютных значений температур в ядерную зиму, погибнут. Морозостойкость озимой ржи составляет $(-30)^{\circ}\text{C}$, а пшеницы в зависимости от сорта (-16) - $(-26)^{\circ}\text{C}$. В ядерную зиму температуры в зоне озимых культур будут (-22) - $(-40)^{\circ}\text{C}$. Следовательно, небольшая часть (около 10%) Если ядерная война начнется в январе, то гибель животных в умеренных и высоких широтах Северного полушария будет определяться сильными холодами и сложностью при низкой освещенности найти достаточно пищи для поддержания взрослых в этих условиях энергетических потребностей. Гибель млекопитающих и птиц в этих условиях будет полной. Гибель животных в тропической зоне будет приблизительно такой же, как и в случае ядерной войны, начавшейся в июле.

7. Океан. Океан является наиболее консервативным блоком биосферы. За счет своих размеров он демпфирует многие локальные колебания климатических и биогеохимических факторов. Наибольшее влияние на его экосистемы окажет, по-видимому, ядерная зима. Однако в течение ядерной зимы поверхностный слой океана охладиться на $1,2^{\circ}$ расчетам [4]. Поэтому основным фактором, влияющим на биоту океана, будет падение освещенности и полное прекращение фотосинтеза. Произойдет значительное уменьшение количества фитопланктона, но полной гибели его не будет, так как многие виды перейдут в состояние покоя и переживут ядерную зиму. По ее окончании количество фитопланктона восстановится в течение нескольких лет. Возможна гибель многих видов рыб, главным образом из-за отсутствия достаточного количества пищи и невозможности ее найти из-за низкой освещенности. Однако полного распада трофической пирамиды не произойдет, поскольку в пищевых цепях останутся нетронутыми бактериопланктон и растворенное органическое вещество. Таким образом, ядерная зима окажет самое сильное воздействие на экосистемы суши. Если война начнется летом, то вымерзнет большая часть растительности Северного полушария. Тропическая растительность будет уничтожена в любом случае. Образовавшиеся огромные площади мертвых лесов будут служить материалом для вторичных лесных пожаров. Разложение этой мертвой органики приведет к выбросу в атмосферу большого количества углекислого газа, серьезно нарушится глобальный цикл углерода. Уничтожение растительности (особенно в тропиках) вызовет активные процессы эрозии почвы. Погибнут практически

все виды млекопитающих и птиц. Ядерная зима нанесет серьезный ущерб агроэкосистемам. Вымерзнут все плодовые деревья, виноградники и т. п. Погибнут практически все популяции сельскохозяйственных животных, поскольку инфраструктура животноводства будет разрушена. Восстановление части растительности возможно (сохранятся семена), но этот процесс будет замедлен воздействием других факторов ядерной войны.

2. Долговременные климатические последствия ядерной зимы После окончания ядерной зимы для большинства экосистем интенсивность круговорота химических элементов (углерод, азот и др.), а также общее количество вещества, участвующего в круговороте, уменьшится. В результате увеличится количество CO₂ в атмосфере, увеличится накопление биогенных элементов в водоемах. Из-за пожаров в атмосферу поступит значительное количество CO₂. Гибель деревьев в результате климатического и радиационного стрессов приведет (за счет разложения органического вещества древесины) к дополнительному потоку CO₂ в атмосферу. В результате уменьшения продуктивности растений суши количество гумуса также станет уменьшаться. Следовательно, суша станет источником атмосферного CO₂. Поглощение избытков атмосферного CO₂ долгое время будет определяться океаном. Сделаем оценку изменения CO₂ в атмосфере и средней глобальной температуры, исходя из следующего сценария. Считая, что основной поток углерода в атмосферу через три года после войны будет определяться разложением мертвой органики, погибшей во время ядерной зимы. Через 30 лет количество CO₂ в атмосфере увеличится в 1,6 раза, а температура (за счет парникового эффекта) поднимется на 1,3° С. Затем начнется медленный спад, который будет продолжаться до 100-150 лет. Общий вывод, касающийся биогеохимических циклов, состоит в том, что уничтожение лесов и замена лесных экосистем травяными и болотными резко уменьшают устойчивость биосферы в целом и ее способность к демпфированию климатических вариаций. Это объясняется тем, что лесные экосистемы наиболее эффективно регулируют глобальный углеродный цикл и тесно связанную с ним глобальную температуру атмосферы. Поэтому климат станет менее устойчивым.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.В., Архипов П.Л., Пархоменко В.П., Стенчиков Г.Л. Глобальная модель системы океан - атмосфера и исследование ее чувствительности к изменению концентрации CO₂. // Изв. АН СССР, сер. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 5. с. 451-458.
2. Александров Г.А., Арманд А.Д., Свирежев 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.
3. Касперска-Палач А. Механизм закаливания травянистых растений. // Холодостойкость растений, Под ред. Г.А.Самыгина. М.: Колос. 1983. с. 112.
4. Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. М.: Наука. 1985. 272 с.
5. Туманов Н.И. Физиология закаливания и морозостойкости растений. М.: Наука. 1979.
6. Aleksandrov V.V., Stenchikov G.L. On the modelling of the climatic consequences of the nuclear war. Moscow: Computer Center, USSR Acad. Sci. 1983.
7. Ambio. 1982, V. 11, N 2-3.
8. Environmental Consequences of Nuclear War. Physical and Atmospheric Effects. SCOPE 28. - Eds.: Pittock A.B., Ackerman T.P., Crutzen P.J., MacCracken M.C., Shapiro C.S., Turco R.P. - Wiley, U.K. , 1985. V. 1, 359 pp.
9. Environmental Consequences of Nuclear War. Ecological and Agricultural Effects. SCOPE 28. - Eds.: Harwell M.A., Hutchinson T.C. Wiley, U.K., 1985. V. 2. 523 pp.
10. Тарко А.М. Моделирование глобальных биосферных процессов в системе атмосфера - растения - почва. // Динамическое моделирование в агрометеорологии, Ред. Ю.А. Хваленский, Л., Гидрометеиздат, 1982, с. 8-16.