

УДК 537.523+532.51

СТРУКТУРА ВОЗМУЩЕННОЙ ОБЛАСТИ АТМОСФЕРЫ ПОСЛЕ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА В ХИРОСИМЕ

М. Д. Щербин, К. В. Павлюков, А. А. Сало,
С. Ф. Перцев, А. В. Рикунев

12-й Центральный научно-исследовательский институт
Министерства обороны Российской Федерации, 141307 Сергиев Посад
E-mail: fgu12tsnii@mil.ru

Предпринята попытка описания развития возмущенной области атмосферы при ядерном взрыве, произведенном 6 августа 1945 г. в Хиросиме. При численном моделировании явления используются уравнения динамики для невязкого нетеплопроводного газа с учетом горения городской застройки, фазовых превращений воды, электризации частиц льда и вымывания частиц сажи. Результаты численного расчета развития возмущенной области атмосферы свидетельствуют об образовании ливневых осадков, формировании грозового облака с молниевыми разрядами, вымывании частиц сажи и образовании вертикальных вихрей. Временная последовательность отмеченных метеорологических явлений соответствует данным наблюдений. Используемые при решении задачи предположения и приближения обуславливают качественный характер полученных результатов. Уточнение этих результатов может быть осуществлено при более подробном изучении приближенных начальных и граничных условий задачи.

Ключевые слова: атмосфера, конвекция, взрыв, осадки, смерч, электрическое поле.

Введение. Ядерный взрыв в Хиросиме был произведен 6 августа 1945 г. После взрыва возник крупномасштабный пожар, вызвавший интенсивные ливни, загрязненные частицами сажи, формирование грозового облака с молниевыми разрядами и образование смерча [1]. Различные аспекты поражающего действия этого взрыва тщательно изучены и в значительной степени обобщены в [2]. Вместе с тем не выявлены работы, в которых рассматриваются материалы исследований, посвященные описанию развития поля течений в атмосфере после взрыва и характеризующие отмеченные выше метеорологические последствия. Целью настоящей работы является попытка описания всего комплекса отмеченных выше метеорологических последствий взрыва с использованием существующих моделей описания отдельных физических процессов в атмосфере, определяющих полноту отклика атмосферной среды на крупномасштабное воздействие.

Для решения данной задачи используется методика, разработанная для описания структуры возмущенной области при ядерном взрыве во влажной атмосфере [3]. Особенностью этой методики является то, что при численном моделировании крупномасштабной конвекции в атмосфере основное внимание уделяется исследованию процессов образования и переноса поля завихренности течения [4], турбулентность среды не учитывается, для описания поля течений в возмущенной области используются уравнения Эйлера.

Возможность пренебрежения турбулентностью среды при расчетах крупномасштабной конвекции следует из анализа специфики турбулентного переноса в вихревом потоке [5]. Турбулентный перенос тепла и импульса подавляется по направлению к центру области вращения газа. С физической точки зрения это обусловлено затратами турбулентной энергии на преодоление центробежных сил и сил плавучести во вращающемся стратифицированном потоке. Получение данных о формировании плавучего вихревого кольца в [6–8] из всплывающего в поле силы тяжести сферического объема легкого газа оказалось возможным в результате корректного расчета стадии формирования вихревого движения вследствие влияния эффекта Бьеркнеса.

Изложенный в [3] метод определения структуры возмущенной области атмосферы после взрыва включает модели описания изменений фаз воды и электризации осадковых частиц в твердой фазе. Указанный метод используется не только для расчетов развития взрывов в атмосфере, но и для описания развития в ней грозовой активности [3, 9] и отдельных случаев формирования вертикальных вихрей (смерчей) [10, 11]. В [3] изложен двумерный вариант метода. В настоящей работе рассматривается его трехмерный вариант, что соответствует постановке задачи.

1. Формирование возмущенной области. Данные наблюдений за развитием возмущенной области после взрыва, служащие основой при постановке задачи численного моделирования явления и последующего анализа результатов расчетов, изложены в [1, 2]. В момент взрыва (8 ч 15 мин) в районе Хиросимы наблюдалось условно-неустойчивое состояние атмосферы. Температура воздуха на поверхности земли составляла $26,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, атмосферное давление на уровне моря — 1018 мбар, влажность достигала 80 %, видимость была хорошей. В северной части Хиросимы дул северный ветер, а на юге центральной части города преобладал южный бризовый ветер.

Приблизительно через 30 мин после взрыва в городе возник пожар, который затем превратился в огненный шторм, сопровождаемый ливнями с вовлечением в них частиц сажи. Загрязненный дождь содержал такое количество примесей, что вода в реке воспринималась наблюдателями черной, “как будто в нее были вылиты китайские чернила”. К 10 ч сформировалась гроза с молниевыми разрядами. После 11 ч, когда развитие пожара достигло пика, возник смерч. Метеорологические данные о состоянии верхних слоев атмосферы не были зарегистрированы, однако имеющиеся синоптические карты позволяют оценить характер перемещения воздушных масс над Хиросимой в рассматриваемый период.

2. Модели для описания структуры возмущенной области. При проведении расчетов использовалось несколько моделей, описывающих физические процессы в возмущенной области.

2.1. Модель конвективных течений. Численная модель, описывающая крупномасштабную конвекцию в атмосфере, достаточно полно изложена в [4, 9]. Суть этой модели заключается в использовании для описания аэродинамических течений в возмущенной области атмосферы уравнений газовой динамики для невязкого нетеплопроводного газа. Давление воздуха определяется из уравнения состояния идеального газа. Для высокотемпературной среды (при расчете взрывов) используется уравнение состояния реального газа [12].

К правой части уравнения сохранения импульса добавлено условие гидростатического равновесия атмосферы с плотностью и давлением, зависящими от высоты, что позволило избежать нефизичных осцилляций при численном моделировании газодинамических течений в атмосфере [13].

Для решения системы уравнений газовой динамики в конечно-разностном представлении используется численный алгоритм, обладающий минимальными диссипативными свойствами [14–18].

2.2. *Модель фазовых превращений воды в атмосфере.* Содержащаяся в атмосфере влага в результате перемещения ее конвективным потоком в область с более низкой температурой претерпевает фазовые превращения, вследствие чего формируются частицы жидкой и твердой фаз воды. Выделяемая или поглощаемая (при обратном процессе) тепловая энергия оказывает влияние на интенсивность конвективного потока.

Для определения основных закономерностей развития грозовой активности атмосферы в рассматриваемой модели применяется схема параметризации микрофизических процессов, предложенная в [19] и включающая шесть взаимодействующих классов частиц воды в различных фазах: водяной пар, мелкие облачные капли, крупные капли (дождь), мелкие частицы льда (кристаллы), крупные частицы льда (град), снег. В качестве функции распределения крупных частиц по размерам используется экспоненциальное распределение Маршалла — Пальмера [20], для мелких частиц — монодисперсное распределение.

В настоящей работе для мелких частиц используется гамма-распределение [21]. Вместе с тем представленная в [19] схема микрофизических процессов, описывающих взаимодействие различных классов частиц воды, дополнена схемой процесса образования вторичных ледяных кристаллов, скорость которого определяется согласно [22].

Для учета физических характеристик среды, содержащей водяной пар и дисперсные частицы, в систему уравнений газовой динамики вносятся соответствующие изменения. В качестве плотности среды рассматривается плотность влажного воздуха, включающая плотность сухого воздуха, плотность водяного пара, плотность частиц тумана и кристаллов льда, а также плотность частиц осадков: дождя, снега и града. Скорость движения влажного воздуха описывается в приближении сплошной среды общим уравнением движения. В качестве уравнения состояния среды используется уравнение идеального (реального) газа, записанное для смеси сухого воздуха и водяного пара. В правые части уравнений газовой динамики добавляются слагаемые, описывающие изменение параметров среды за счет микрофизических процессов. Основная система уравнений газовой динамики дополняется уравнениями переноса водяного пара и частиц воды в различных фазовых состояниях. Движение частиц описывается без учета их влияния на воздушную среду. Оседание крупных частиц в поле силы тяжести учитывается, мелких частиц — не учитывается. Считается, что частицы, диаметр которых не превышает 100 мкм, полностью увлекаются конвективным потоком.

Уравнения, описывающие микрофизические процессы, решаются без учета процесса газодинамического переноса воздушной среды, при этом реализуется принцип расщепления по физическим процессам. Метод решения этих уравнений аналогичен методу, используемому в [19].

2.3. *Модель электризации частиц твердой фазы воды.* При описании процессов электризации частиц воды принимаются следующие основные допущения:

- электрические процессы рассматриваются только для твердых фаз воды;
- генерация заряда на частицах льда осуществляется на основе неиндуктивного “столкновительного” механизма;
- процессы соударения частиц одного класса не рассматриваются;
- влияние электрического поля на микрофизические процессы и движение заряженных частиц не учитывается;
- пространственное распределение зарядов, сосредоточенных на кристаллах льда и частицах снега, определяется конвективными течениями воздушной среды; пространственное распределение зарядов на частицах града определяется их осаджением в конвективном потоке;
- возникновение электрического поля обусловлено пространственным разнесением заряженных частиц;
- электрическая проводимость среды не учитывается.

Величина и знак заряда, приобретаемого частицами при столкновении, зависят от их размеров и скорости соударения, а также от температуры и влажности окружающей среды. Из двух существующих в настоящее время наиболее полных моделей такого рода [23, 24] в данной работе используется модель, предложенная в [24].

Изложенная выше схема расчета развития возмущенной области атмосферы с учетом микрофизических процессов изменения фаз воды дополняется уравнениями переноса заряда кристаллами льда, частицами снега и града. Эти уравнения решаются после расчета микрофизических характеристик возмущенной среды.

Величина напряженности электрического поля определяется из соотношения [23]

$$E = -2t^2\pi^2 N_h (V_h - V_i)^2 R_h^2 n_i q_{ih} E_b,$$

где t — время; N_h — количество частиц града; V_h — скорость движения частиц града; V_i — скорость движения кристаллов; R_h — радиус частицы града; n_i — число кристаллов льда; q_{ih} — величина единичного заряда при столкновении кристалла льда с градом; E_b — коэффициент эффективности столкновения частиц.

2.4. *Модель крупномасштабного пожара.* Достаточно подробный обзор работ, посвященных исследованию развития крупномасштабных пожаров, инициированных ядерными взрывами, приведен в [2]. В настоящей работе используется модель, предложенная в [25]. Суть этой модели заключается в следующем. На поверхности земли в заданном районе задаются потоки тепла и массы продуктов горения (сажи и паров воды) в вертикальном направлении. Количество сажи, поступающей в атмосферу, составляет величину, приблизительно равную 4 % массы сгоревшего вещества. Массовая доля воды в продуктах горения принимается равной 30 %. Плотность потока тепла, возникающего при горении городской застройки, достигает значения, равного 100 кВт/м². Выделяющаяся при горении тепловая энергия равномерно распределяется в приповерхностном слое высотой порядка 100 м. Продолжительность горения городской застройки определяется степенью ее загроможденности горючими материалами. Количество поступающей тепловой энергии линейно изменяется во времени от нуля в момент взрыва (начало расчета) до максимального значения, достигаемого через 15 мин после взрыва.

Варьируя величину энерговыделения, время достижения ее максимального значения и продолжительность горения, можно учесть особенности горения конкретной городской застройки. Так, данные наблюдений за крупномасштабным пожаром в Хиросиме показывают, что его развитие достигло пика приблизительно через 3 ч после взрыва. Возможно, к этому моменту времени поле воздушных течений в рассматриваемом районе приобрело достаточно регулярный характер, а максимальное энерговыделение могло быть достигнуто в более ранние моменты времени. Вследствие этого представляется целесообразным рассмотреть два варианта энерговыделения при крупномасштабном пожаре, величина которого линейно растет во времени от нуля в момент взрыва до максимума, достигаемого через 15 и 120 мин после взрыва. Для современных городов характерно максимальное значение энерговыделения 100 кВт/м² [25]. Ниже в расчетах развития данного пожара использовано значение 50 кВт/м², по-видимому, более соответствующее характеру застройки Хиросимы в 1945 г., что подтверждают оценки, приведенные в [2].

В настоящей работе указанная выше модель пожара реализована за счет постановки соответствующих граничных условий поступления тепла и массы продуктов горения с поверхности земли в атмосферу.

2.5. *Модель вымывания частиц сажи из возмущенной области.* При горении поступающая в атмосферу сажа переносится конвективными потоками как невесомая пассивная примесь. При столкновении с частицами осадков она захватывается последними и вовлекается в движение, направленное к поверхности земли. Предполагается, что при осаждении

частица дождя захватывает все частицы сажи, встречающиеся на ее траектории движения в объеме, пропорциональном площади ее поперечного сечения. При этом частицы дождя с сажей выделяются в дополнительный класс частиц, что упрощает анализ пространственного распределения продуктов горения.

3. Начальные и граничные условия. Численное моделирование развития возмущенной области осуществляется в трехмерной постановке в декартовой системе координат (x, y, z) . Расчетная область имеет форму параллелепипеда с начальными размерами $2 \times 2 \times 1$ км и с начальным размером счетной ячейки 25 м. Верхняя и боковые границы области подвижны, на них ставятся граничные условия невозмущенной атмосферы и заданной геометрии ветрового поля. На нижней границе ставятся условия для “твердой стенки”, а в зоне горения задаются потоки тепла в вертикальном направлении. Ось Ox направлена на север, ось Oy — на восток.

В качестве начального возмущения атмосферы используются рассчитанные в одномерном приближении значения газодинамических параметров светящейся области ядерного взрыва мощностью 15 кт на высоте 580 м в момент времени, предшествующий началу отражения ударной волны от поверхности земли (нижней границы расчетной области) [26].

Выше отмечался факт отсутствия экспериментальных данных о распределении метеорологических параметров по высоте в момент взрыва. Известно только, что состояние атмосферы характеризуется как условно-неустойчивое. Вследствие того что при воздействии на рассматриваемую атмосферу возникает грозовая активность, при выборе состояния атмосферы для проведения расчета в качестве его основной характеристики используется грозовой индекс φ , методика определения которого изложена в [27, 28].

Поскольку грозовая ситуация в атмосфере возникает в случае, когда значение φ является положительным, из архива метеорологических данных [29] были выбраны два состояния атмосферы с различными значениями грозового индекса $\varphi = 3,2; 1,3^\circ$. Основные характеристики этих состояний приведены на рис. 1 (H — расстояние от поверхности земли, T — температура, f, ψ — абсолютная и относительная влажность воздуха). В случае $\varphi = 3,2^\circ$ (см. рис. 1, *a, б*) состояние атмосферы отличается наличием влажно-неустойчивой зоны большой протяженности — от поверхности земли до тропопаузы. В случае $\varphi = 1,3^\circ$ (см. рис. 1, *в, г*) протяженность влажно-неустойчивой зоны меньше. Высота этой зоны достигает 8 км. Использование в расчетах указанных состояний позволяет оценить чувствительность полученных результатов к изменению исходных данных. Физические параметры, характеризующие состояние атмосферы в начальный момент времени, задаются во всей расчетной области и сохраняются на ее границах до конца расчета.

На нижней границе расчетной области, отождествляемой с поверхностью земли, ставятся условия, обеспечивающие развитие конвективных потоков в атмосфере при крупномасштабном пожаре. На рис. 2 показан район массовых пожаров, который в расчетах аппроксимируется круговой зоной. Над этой зоной в слое воздуха, высота которого равна вертикальному размеру расчетной ячейки, задаются количество тепла, соответствующее интенсивности энерговыделения при данном пожаре, масса частиц сажи и дополнительное количество водяного пара, поступающие в расчетную область в течение временного шага пропорционально заданной скорости горения. В процессе расчета размеры расчетной области увеличиваются, соответственно изменяются размеры ячейки (с 25 до 350 м).

На рис. 2 стрелками показаны направления основных ветровых потоков вблизи поверхности земли. Для воспроизведения морского бриза над поверхностью земли в расчетной области задается юго-западный ветер со скоростью 1,7 м/с, направление которого с увеличением высоты (до 600 м) линейно изменяется на юго-восточное, при этом скорость ветра увеличивается до 4 м/с. С увеличением высоты до 6 км направление ветра изменяется на юго-западное, а скорость возрастает до 7 м/с. В более высоких слоях атмосферы скорость

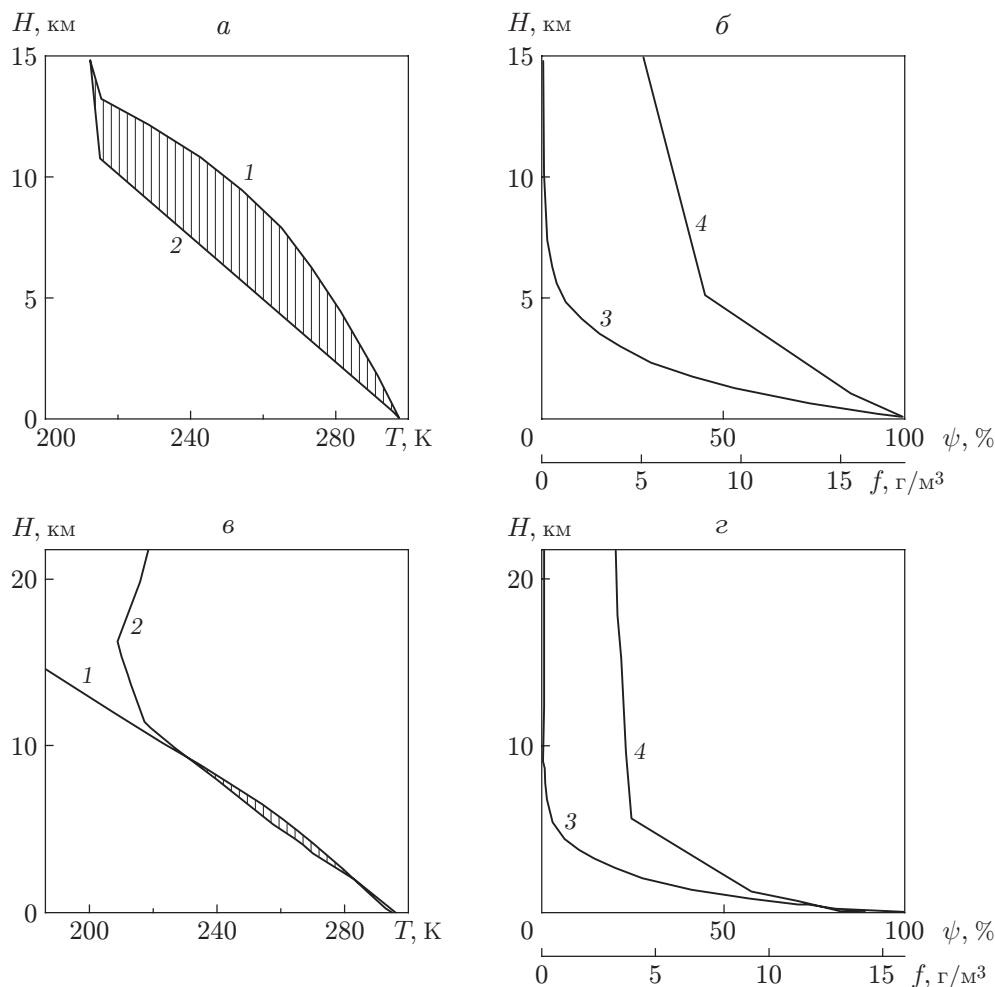


Рис. 1. Параметры состояния влажно-неустойчивой атмосферы:
а, б — $\varphi = 3,2^\circ$, *в, г* — $\varphi = 1,3^\circ$; 1 — адиабата влажного воздуха, 2 — температура атмосферы, 3 — абсолютная влажность, 4 — относительная влажность; заштрихованная область — влажно-неустойчивая зона

ветрового потока линейно увеличивается, достигая 16 м/с на высоте 12 км. В северной части расчетной области задается ветер северного направления, имеющий скорость 2 м/с, который моделирует горно-долинный ветер в приземном слое высотой 1,5 км и шириной около 2 км.

В начальный момент времени бризовый ветер задается во всей расчетной области. Горно-долинный ветер распространяется вглубь расчетной области до эпицентра взрыва. В дальнейшем заданные направления ветров поддерживаются на границах расчетной области.

При расчете процесса электризации частиц твердой фазы воды и определении напряженности электрического поля величина заряда частиц осадков в начальный момент времени — во всей расчетной области, а в последующие моменты — на всех границах равна нулю.

4. Результаты расчетов. Выше отмечалось, что выбранные параметры состояния атмосферы, включая распределение ветровых полей по высоте, и используемая модель крупномасштабного пожара могут иметь значительные погрешности. Заключение о том, в какой степени рассматриваемая постановка соответствует реальной, можно сде-

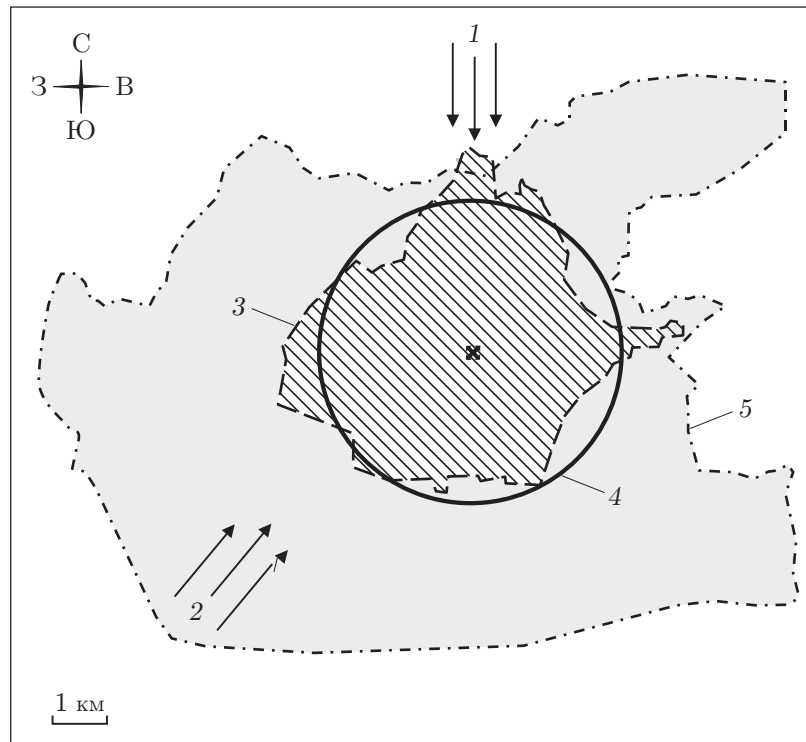


Рис. 2. Схема зоны горения:

1 — горно-долинный ветер, 2 — бризовый ветер, 3 — район пожаров, 4 — круговая зона пожара, 5 — граница города

лать только при сопоставлении результатов расчетов с данными наблюдений. Поэтому полученные в расчете результаты следует считать качественными. Тем не менее, варьируя параметры состояния атмосферы и параметры энерговыделения при пожаре, можно выявить тенденции изменения структуры возмущенной области и получить информацию о реальных параметрах атмосферы и характеристиках пожара.

4.1. *Развитие грозовой активности в возмущенной атмосфере.* Объективной характеристикой развития возмущенной области атмосферы после взрыва в Хиросиме является момент времени формирования грозовой активности (приблизительно 10 ч утра). Поэтому в первую очередь рассмотрим характер изменения максимальной напряженности электрического поля E_{\max} во времени. На рис. 3,а приведена зависимость E_{\max} от времени в атмосфере с грозовым индексом $\varphi = 3,2^\circ$ для двух вариантов поступления энергии из зоны пожара (q_{\max} — максимальное значение энерговыделения, t_e — момент времени после взрыва, в который достигается максимальное энерговыделение). В случае энерговыделения, достигающего максимального значения через 15 мин (пунктирная линия), грозовая активность наступает через 20 мин после взрыва: пики напряженности поля в течение всего исследуемого временного интервала превышают пороговые значения (приблизительно 300 кВ/м) [30], при которых возникает молниевая активность (штриховая линия). Для варианта расчета, в котором максимум энерговыделения достигается через 2 ч после взрыва (сплошная линия), напряженность принимает пороговые значения в момент времени, соответствующий данным наблюдений. В последующие моменты времени фиксируется периодическая молниевая активность, что также соответствует реальным событиям. Полученный результат указывает на предпочтительность использования при моделировании второго варианта энерговыделения. Следует отметить, что в действительности напряженность электрического поля не превышает указанного порогового значения. Возникающая

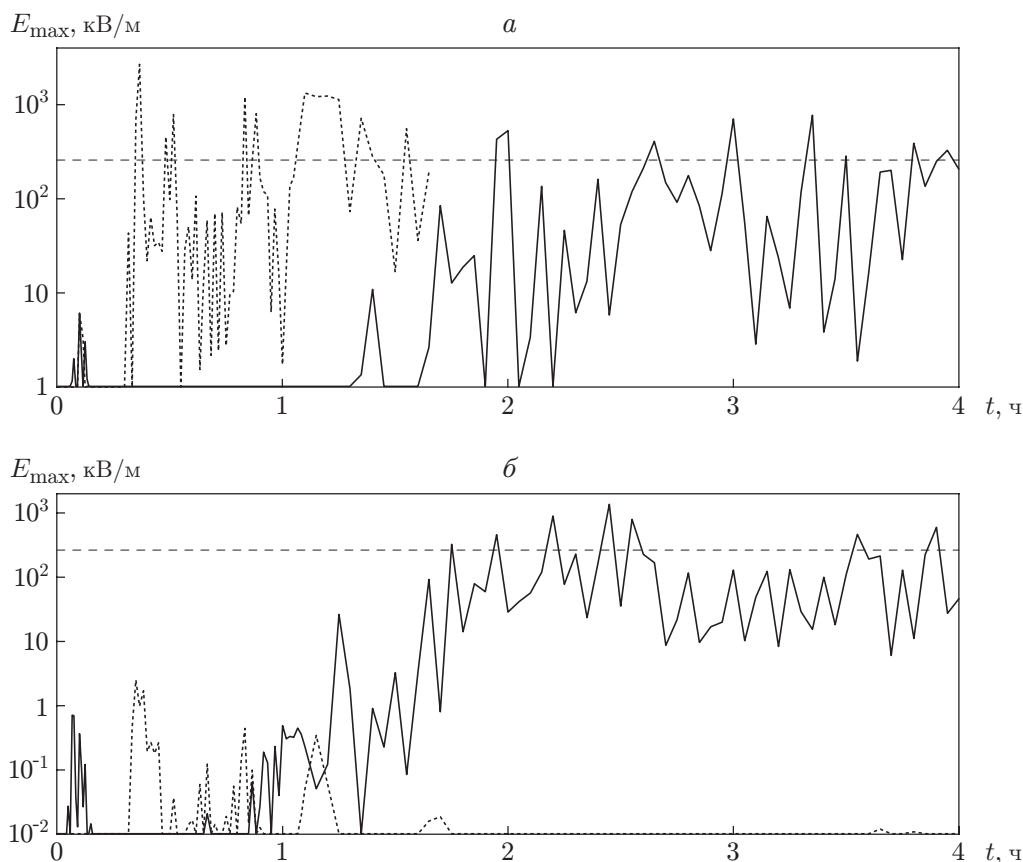


Рис. 3. Зависимость максимальной напряженности электрического поля от времени при пожаре:

a — $q_{\max} = 50 \text{ кВт/м}^2$ (пунктирная линия — $t_e = 15 \text{ мин}$, сплошная — $t_e = 2 \text{ ч}$); b — $t_e = 2 \text{ ч}$ (пунктирная линия — $q_{\max} = 50 \text{ кВт/м}^2$, сплошная — $q_{\max} = 100 \text{ кВт/м}^2$); штриховые линии — пороговое значение E_{\max} , при котором возникает молниевая активность

молниевая активность вызывает уменьшение напряженности поля. Механизм уменьшения напряженности электрического поля вследствие молниевой активности в постановке задачи не учтен.

Характер изменения максимальной напряженности электрического поля во времени при взрыве в атмосфере с $\varphi = 1,3^\circ$ и максимальным энерговыделением через 2 ч после взрыва показан на рис. 3,б (пунктирная линия). Грозовая активность в атмосфере не формируется, следовательно, при проведении расчета взрыва в Хиросиме необходимо использовать параметры атмосферы с грозовым индексом $\varphi = 3,2^\circ$. Тем не менее грозовая активность в атмосфере с $\varphi = 1,3^\circ$ может сформироваться в том случае, если максимальное энерговыделение от горящей застройки будет иметь значение порядка 100 кВт/м^2 , соответствующее загрузке горючими материалами современных мегаполисов. Этот максимум достигается через 2 ч после взрыва, что следует из характера зависимости максимальной напряженности от времени при указанных характеристиках горения (сплошная линия на рис. 3,б). Выше отмечалось, что такое энерговыделение для рассматриваемого случая горения города представляется маловероятным.

4.2. *Формирование структуры возмущенной области.* На начальном этапе ($t < 10 \text{ мин}$) развитие возмущенной области определяется высотой подъема облака взрыва. В дальнейшем формирование поля течений определяется конвективными потоками, на-

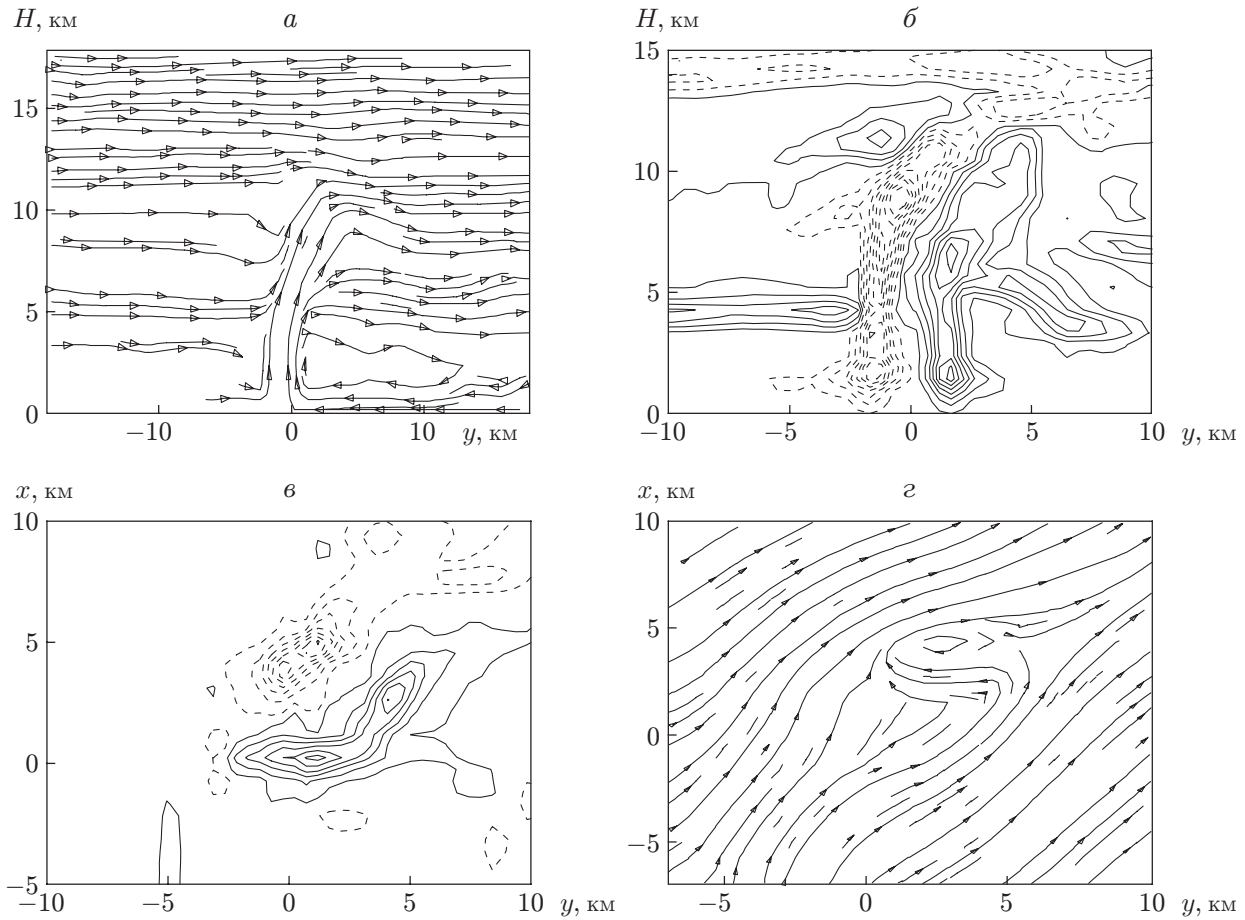


Рис. 4. Структура течений в возмущенной области атмосферы: *a*-*в* — через 2 ч 30 мин после взрыва (*a* — линии тока, *б* — изменение завихренности в горизонтальном направлении, *в* — изменение завихренности в вертикальном направлении), *г* — линии тока через 3 ч после взрыва; штриховые линии — отрицательные значения завихренности, сплошные — положительные значения завихренности, стрелки — направление движение воздуха

правленными от поверхности земли. На рис. 4, *a* приведены линии тока в вертикальном сечении расчетной области, соответствующие моменту времени через 2,5 ч после взрыва. Видно, что в ветровом поле сформировалась развитая конвективная колонка. Следует отметить, что при этом формируется поле течения, изолинии завихренности которого в горизонтальной и вертикальной плоскостях приведены на рис. 4, *б*, *в*. Величина завихренности изменяется в диапазоне от $-0,025$ до $0,025 \text{ с}^{-1}$ с шагом, равным $0,002 \text{ с}^{-1}$ (горизонтальное сечение расположено на высоте $H = 6 \text{ км}$). Такая картина сохраняется в течение всего расчета.

Внешние слои конвективной колонки в начальные моменты ее формирования представляют собой покрытую вихревой пеленой почти цилиндрическую поверхность, состоящую из распределенных по высоте горизонтальных круговых вихревых нитей. Внешний ветровой поток, набега на этот “цилиндр”, поднимает с наветренной стороны элементы вихревых нитей, вследствие чего в горизонтальном сечении выявляются два вихря, вращающиеся в противоположных направлениях (сплошные и штриховые линии на рис. 4, *б*, *в*).

Указанная трансформация горизонтальной завихренности в вертикальную обсуждается в работе [31], в которой также сформулировано предположение о том, что такие

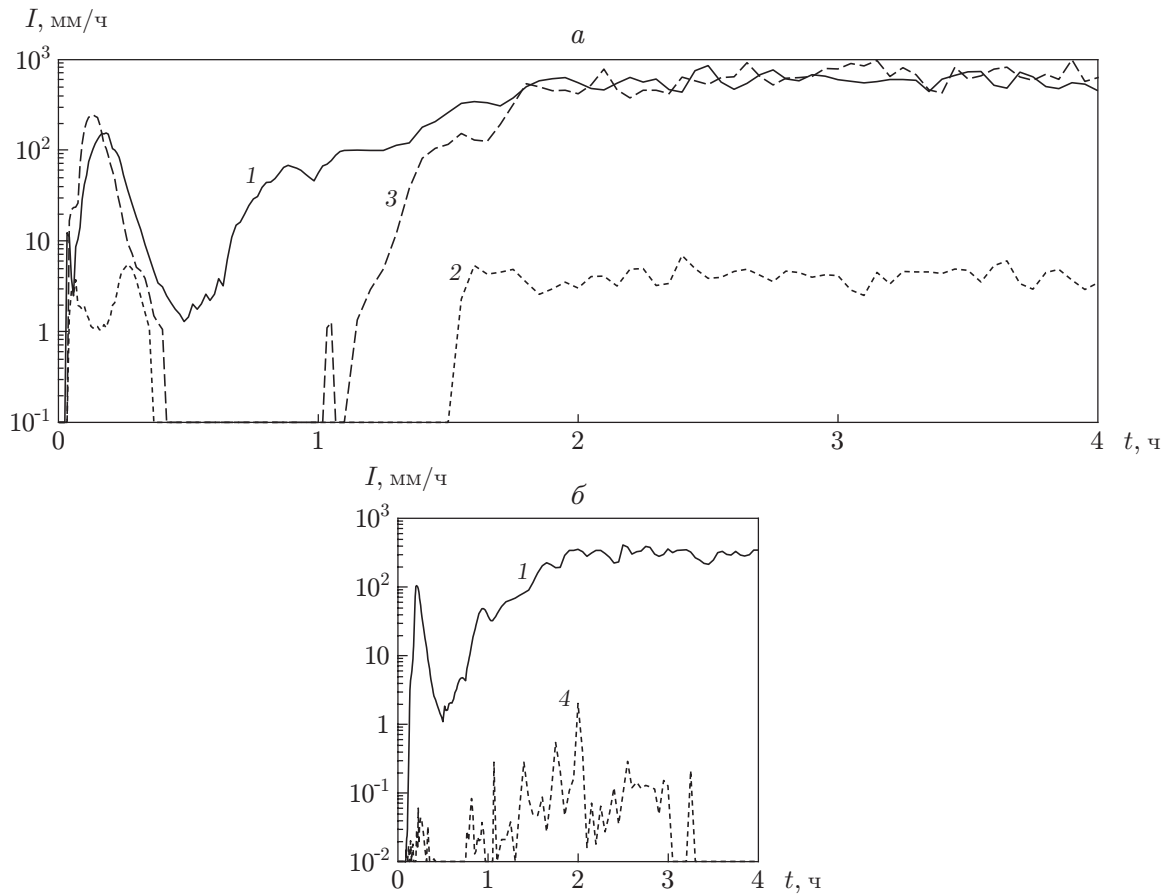


Рис. 5. Зависимости максимальной интенсивности I выпадения дождя, снега, града в возмущенной атмосфере (*а*), а также дождя с сажей и без нее на поверхность земли (*б*) от времени:

1 — дождь, 2 — снег, 3 — град, 4 — дождь с сажей

вертикальные вихри могут быть основным звеном в последующем процессе возникновения торнадо. В проведенном расчете ($\varphi = 3,2^\circ$, максимальное энерговыделение 50 кВт/м^2 через 2 ч после взрыва) представляют интерес характеристики поля течений на высоте $H = 6 \text{ км}$ через 3 ч после взрыва. Результаты анализа линий тока показывают, что в локальной области формируется циркуляционное течение, которое можно интерпретировать как модель реального смерча, образовавшегося именно к этому моменту времени (см. рис. 4,г).

В [11] исследовалось развитие смерча, возникающего в результате горения городской застройки, с учетом влияния силы Кориолиса на конвективный поток, направленный от поверхности земли. В отличие от настоящей работы в [11] рассматриваются более интенсивные потоки тепла, направленные от поверхности земли, и состояние атмосферы со значительно большим значением энергии неустойчивости. Согласно [11] структура течений, подобных смерчевым, формируется через 8 ч после взрыва. В Хиросиме смерч сформировался и приобрел разрушительные свойства через 3 ч после взрыва (через 2,5 ч с момента начала горения).

Рассмотрим поведение частиц осадков в возмущенной атмосфере.

На рис. 5,а приведены зависимости максимальной интенсивности выпадения осадков от времени для частиц различных фаз воды (дождя, снега и града). Осаждение частиц на-

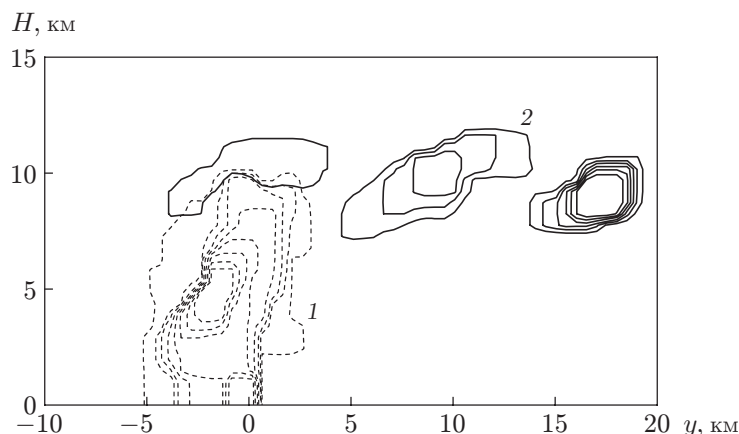


Рис. 6. Поле массовой концентрации частиц сажи и частиц дождя с сажой в вертикальном сечении через 4 ч после взрыва:

1 — дождь с сажой, 2 — сажа

чинается уже в процессе подъема облака, но максимум интенсивности выпадения осадков наблюдается при развитии крупномасштабного пожара. Большие значения интенсивности выпадения частиц града при их столкновении с кристаллами льда обеспечивают накопление электрического заряда в атмосфере, обуславливающего возникновение молниевой активности.

При выпадении дождя происходит захват частиц сажи. На рис. 5,б показаны зависимости максимальной интенсивности выпадения дождя с сажой (пунктирная линия) и без нее (сплошная линия) от времени.

На рис. 6 показано вертикальное сечение пространственного распределения частиц сажи в атмосфере через 4 ч после взрыва. Массовая концентрация частиц сажи изменяется в диапазоне от 0 до $0,02 \text{ мг/м}^3$ с шагом, равным $0,005 \text{ мг/м}^3$, частиц сажи с дождем — в диапазоне от 0 до $0,1 \text{ мг/м}^3$ с шагом, равным $0,05 \text{ мг/м}^3$. Частицы сажи с дождем (штриховые линии) выпадают на поверхность земли. Незахваченные частицы сажи (сплошные линии) переносятся ветровым потоком в виде клубов дыма, наблюдаемых при пожарах.

Пространственное распределение заряда на частицах льда в проекциях на боковую и нижнюю границы расчетной области представлено на рис. 7. Штриховыми и сплошными линиями показаны изолинии плотности зарядов с противоположными знаками. Плотность заряда в вертикальной проекции изменяется в диапазоне от $-0,7$ до $0,1 \text{ пКл}$ с шагом, равным $0,1 \text{ пКл}$, в горизонтальной — в диапазоне от $-1,3$ до $0,1 \text{ пКл}$ с шагом, равным $0,2 \text{ пКл}$. Видно, что электрическое поле в возмущенной области имеет форму диполя, линейный масштаб которого составляет порядка 10 км. Такие размеры имеет единичная ячейка природной грозы.

На рис. 8 в соответствии с данными работ [1, 32] приведены зоны выпадения на местности слабых и сильных осадков в течение 0,5 и 1 ч соответственно. При реконструкции этих зон важной информацией являлись наблюдения очевидцев за уровнем воды в реках [1, 32]. В указанных работах отмечается, что количество осадков, выпавших на поверхность земли, составляет порядка 100 мм. Результаты сравнения расчетной и реконструированной картин выпадения осадков показывают, что они удовлетворительно согласуются.

При анализе данных, приведенных на рис. 8, следует учитывать ряд фактов. В действительности зона горения представляет собой рассредоточенные по городу очаги пожара. В поле ветра в конвективном потоке формируются фронты “порывистости”, которые в конечном счете могут превратить всю зону горения в штормовую ячейку. В данном

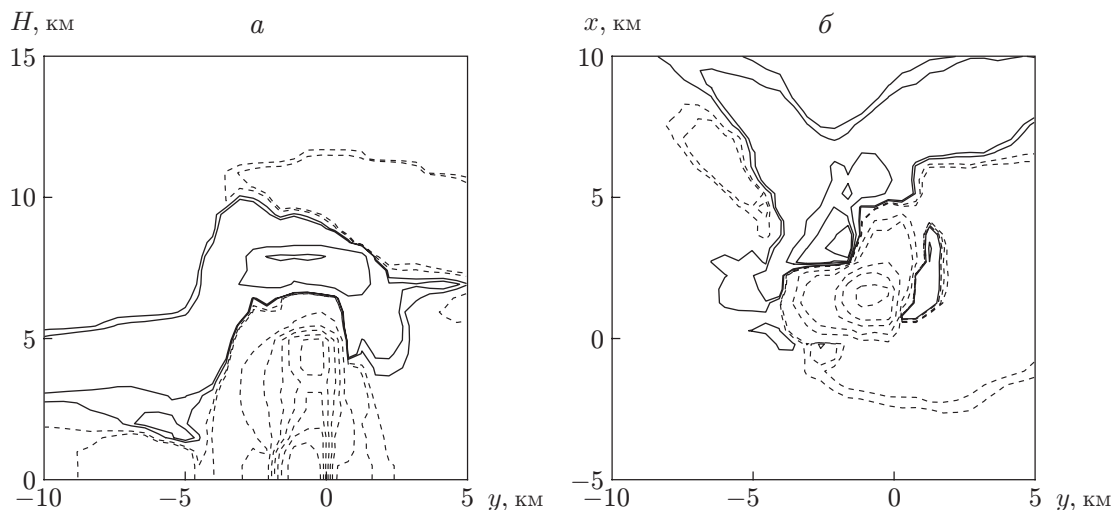


Рис. 7. Пространственное распределение зарядов на твердых частицах воды через 3 ч после взрыва:

a — вертикальная проекция на боковую границу расчетной области, *b* — горизонтальная проекция на нижнюю границу расчетной области; штриховые линии — отрицательные значения плотности заряда, сплошные — положительные значения плотности заряда

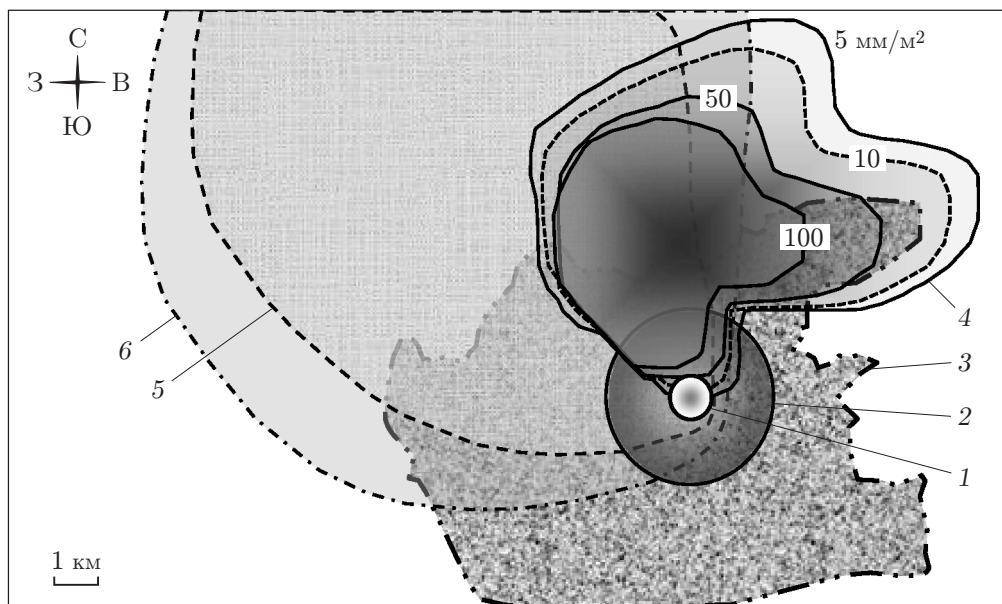


Рис. 8. Результаты наблюдений и расчета зон осадков на местности:

1 — эпицентр взрыва, 2 — зона пожара, 3 — граница города, 4 — изолинии количества осадков через 3 ч после взрыва (расчет), 5 — зона сильных осадков через 1 ч после взрыва (наблюдения), 6 — зона слабых осадков через 0,5 ч после взрыва (наблюдения)

случае эта ячейка превратилась в так называемый огненный шторм [33]. В настоящее время физико-математические модели, описывающие такой класс течений в атмосфере, отсутствуют. Поэтому различие реконструированных и расчетных зон выпадения осадков представляется вполне закономерным. Кроме того, на формирование “штормовой ячейки” оказывают влияние рельеф местности (город находится в долине, окруженной грядой холмов высотой до 800 м) и распределение ветровых потоков как вдоль поверхности земли, так и по высоте. Учет указанных факторов позволит более точно воспроизвести реальную картину развития возмущенной области.

Заключение. В результате проведенных расчетов формирования структуры возмущенной области атмосферы после ядерного взрыва в Хиросиме получена картина развития наблюдаемых явлений: выпадения грязевых дождей, формирования грозы и вертикальных вихрей. Показано, что выявленные метеорологические явления, как и их временная последовательность, близки к реально наблюдавшимся.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о применимости используемого вычислительного метода для описания сложных явлений в атмосфере, к числу которых относится формирование возмущенной области атмосферы после взрыва в Хиросиме. Эффективность метода определяется точностью используемых моделей описания микрофизических процессов фазовых превращений воды, электризации частиц осадков и численного алгоритма решения уравнений газовой динамики.

Вместе с тем целесообразно дальнейшее совершенствование вычислительного комплекса. Это позволит более точно описать физические характеристики среды при ее крупномасштабном возмущении в локальных областях атмосферы.

В предложенном методе процесс вымывания частиц примеси описывается с учетом их столкновения с частицами дождя. Ясно, что в реальных условиях примесь может захватываться и другими частицами осадков. Вместе с тем частицы примеси являются ядрами конденсации и опосредованно участвуют в микрофизических процессах.

В рамках трехмерного численного алгоритма с использованием равномерных расчетных сеток при описании крупномасштабной конвекции не представляется возможным получить необходимое пространственное разрешение структуры вертикального вихря типа смерча. Его образование может существенно изменить структуру течений в локальной области возмущенной атмосферы, например вблизи поверхности земли. Поэтому для описания вихревой структуры требуется адаптация расчетной сетки в некоторых локальных зонах. Один из способов решения такой задачи предложен в [34]. Необходима также адаптация расчетной сетки в зоне горения. Это позволит получить более детальное описание конвективных потоков от распределенных по поверхности земли очагов пожара.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ishikava E.** Hiroshima and Nagasaki, the physical, medical and social effects of the atomic bombing / E. Ishikava, D. L. Swain. N. Y.: Basic Books, 1981.
2. **Питток Б.** Последствия ядерной войны: Физические и атмосферные эффекты / Б. Питток, Т. Акермен, П. Крутцен, М. Мак-Кракен, Ч. Шапиро, Р. Турко. М.: Мир, 1988.
3. **Павлюков К. В., Сало А. А., Щербин М. Д.** Развитие возмущенной области при взрыве во влажной атмосфере // Физика ядерного взрыва: В 5 т. Т. 1. Развитие взрыва. Изд. 3-е, доп. М.: Наука. Физматлит, 2009. С. 413–446.
4. **Гордейчик Б. Н., Забавин В. Н., Щербин М. Д.** Облако взрыва и пылевые образования // Физика ядерного взрыва: В 5 т. Т. 1. Развитие взрыва. Изд. 3-е, доп. М.: Наука. Физматлит, 2009. С. 375–412.

5. **Онуфриев А. Т., Христианович С. А.** Об особенностях турбулентного движения в ядре вихревого кольца // Докл. АН СССР. 1976. Т. 229, № 1. С. 42–44.
6. **Даринцев А. П., Забавин В. Н., Замышляев Б. В. и др.** Особенности движения нагретой массы воздуха, первоначально помещенной в сферический объем, в атмосфере // Современные проблемы механики сплошной среды. М.: Моск. физ.-техн. ин-т, 1985. С. 126–135.
7. **Горбунов С. Ю., Гордейчик Б. Н., Даринцев А. П. и др.** О структуре всплывающего термика // ПМТФ. 1992. № 5. С. 70–76.
8. **Чуприн И. А., Щербин М. Д.** Численное моделирование турбулентного термика // ПМТФ. 2003. Т. 44, № 3. С. 64–75.
9. **Павлюков К. В., Сало А. А., Щербин М. Д.** Численное моделирование развития грозовой активности в атмосфере // Изменение окружающей среды и климата: Природные и связанные с ними техногенные катастрофы: В 8 т. Т. 7. Динамика и математическое моделирование геофизических и гидрометеорологических процессов. М.: Ин-т физики Земли РАН, 2008. С. 145–162.
10. **Андрианов С. А.** Численное моделирование интенсивных вертикальных вихрей в атмосфере / С. А. Андрианов, И. И. Васильченко, В. Н. Забавин, А. Т. Онуфриев, Л. И. Турчак, М. Д. Щербин. М.: Вычисл. центр РАН, 2000.
11. **Андрианов С. А., Васильченко И. И., Голицин Г. С. и др.** Численное моделирование процессов формирования “огненного смерча” // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39, № 1. С. 3–13.
12. **Кузнецов Н. М.** Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965.
13. **Book D. L., Fry M. A.** Air blast simulations using flux-corrected transport codes // Computational techniques and applications. S. l.: Elsevier Sci. Publ., 1984. P. 826–840.
14. **Book D. L., Boris J. P.** Flux-corrected transport. 1. SHASTA, a fluid transport algorithm that works // J. Comput. Phys. 1973. V. 11, N 1. P. 38–69.
15. **Book D. L., Boris J. P., Hain K.** Flux-corrected transport. 2. Generalizations of the methods // J. Comput. Phys. 1975. V. 18, N 3. P. 248–283.
16. **Book D. L., Boris J. P.** Flux-corrected transport. 3. Minimal-error FCT algorithms // J. Comput. Phys. 1976. V. 20, N 3. P. 397–431.
17. **Book D. L., Boris J. P.** Solution of continuity equations by the method of flux-corrected transport // Methods in computational physics: Advances in research and applications. V. 16. Controlled fusion. N. Y.; San Francisco; L.: Acad. Press, 1976. P. 85–129.
18. **Finite-difference techniques for vectorized fluid dynamics calculations** / Ed. by D. L. Book. N. Y.; Heidelberg; Berlin: Springer Verlag, 1981.
19. **Gilmore M. S., Straka J. M., Rasmussen E. N.** Precipitation and evolution sensitivity in simulated deep convective storms: Comparisons between liquid-only and simple ice and liquid phase microphysics // Mon. Weather Rev. 2004. V. 132. P. 1–12.
20. **Marshall J. S., Palmer W. M.** The distribution of raindrops with size // J. Meteorol. 1948. N 5. P. 165–166.
21. **Thompson G., Field P. R., Hall W. D., Rasmussen R. M.** A new bulk microphysical parameterization for WRF (and MM5) // Proc. of the 7th Weather research and forecasting user’s workshop, 19–22 June 2006. Boulder: NCAR, 2006. P. 1–11.
22. **Cooper W. A., Hobbs H. V.** Field evidence supporting quantitative predictions of secondary ice production rates // J. Atmospheric. Sci. 1987. V. 44. P. 1071–1082.
23. **Takahashi T.** Riming electrification of a charge generation mechanism in thunderstorm // J. Atmospheric. Sci. 1978. V. 35. P. 1536–1548.

24. **Saunders C. P. R., Keith W. D., Mitzeva R. P.** The effect of liquid water on thunderstorm charging // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 11007–11017.
25. **Small R. D., Haikes K. E.** Early cloud formation and large area fires // *J. Appl. Meteorol.* 1998. V. 27. P. 654–663.
26. **Азаров В. Н., Выскребенцев В. С., Кострыкин В. С., Сомов М. В.** Светящаяся область и световое излучение // *Физика ядерного взрыва: В 5 т. Т. 1. Развитие взрыва.* Изд. 3-е, доп. М.: Наука. Физматлит, 2009. С. 145–166.
27. **Славин И. А.** Неадиабатический метод прогноза гроз. Л.: Ленингр. военно-инж. краснознам. академия им. Можайского, 1963.
28. **Зверев А. С.** Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1968.
29. **Integrated global radiosonde archive.** [Electron. resource]. Режим доступа: www.weather.uwo.edu/upperair/naconf.html. 2005.
30. **Helsdon J. H., Farley R. D.** A numerical study of montana thunderstorm. 2. Model results versus observations involving electrical aspects // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92, N D5. P. 5661–5675.
31. **Straka J. M., Rasmussen E. N., Davies-Jones R. P., Markowski P. M.** An observational and idealized numerical examination of low-level counter-rotating vortices in the rear flank of supercells // *Electron. J. Severe Storms Meteorol.* 2007. V. 2, N 8. P. 1–22.
32. **Molenkamp C. R.** Numerical simulation of self-induced rainout using a dynamic convective cloud model // *Proc. of the 8th Intern. conf. on cloud physics, Clermond-Ferrand, France, 15–19 July 1980.* Livermore: Lawrence Livermore Lab., 1980. P. 503–506.
33. **Дельгадо Дж. П.** Атомная бомба. Манхэттенский проект. Начало нового отсчета истории человечества. М.: Эксмо, 2011.
34. **Simpson J., Roff G., Morton B. R., et al.** A Great Salt Lake waterspout // *Mon. Weather Rev.* 1991. V. 119. P. 2741–2770.

*Поступила в редакцию 17/VIII 2012 г.,
в окончательном варианте — 12/III 2013 г.*
