

УДК 550.314+550.344+551.511+551.596:550.388

Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

**Физические процессы в околоземной среде,
сопровождавшие военные действия в Ираке
(март — апрель 2003 г.)**

Надійшла до редакції 10.06.03

Виконано оцінки ефектів в атмосфері, які супроводжували інтенсивні ракетно-бомбові удари та сильні пожежі. Обчислено енергетичні характеристики процесів, маси викинутих в атмосферу пилу, диму та хімічних речовин. Оцінено збурення атмосферного електричного поля, потоки акусто-гравітаційних та електромагнітних хвиль. Обговорюються екологічні наслідки дій на атмосферу. Показано, що енергетика вторинних процесів, пов'язаних з екрануванням сонячного випромінювання, на три — п'ять порядків перевищує енергетику первинних процесів. Відмічається, що найсерйозніші екологічні наслідки зумовлені горінням нафтових свердловин. Продемонстровано, що дія на атмосферу в ході сучасних регіональних неядерних війн може бути значною.

Список сокращений

- АГВ — акусто-гравитационные волны
ВГВ — внутренние гравитационные волны
СБА — стратегическая бомбардировочная авиация
ТПА — тактическая и палубная авиация
АСН — авиация специального назначения
КР — крылатые ракеты
ВВ — взрывчатые вещества
ВД — военные действия
РБУ — ракетно-бомбовые удары

ВВЕДЕНИЕ

Современные региональные войны и конфликты, являясь неядерными, используют достаточно мощные средства ведения военных действий. К ним относятся: стратегическая бомбардировочная авиация (СБА), тактическая и палубная авиация (ТПА), авиация специального назначения (АСН), авианосцы, носители крылатых ракет (КР) морского базирования (атомные подводные лодки и надводные корабли).

За последние 12 лет по инициативе США произошли четыре региональные войны (операция «Буря в пустыне» против Ирака в 1991 г., военные действия сил НАТО против Югославии в 1999 г., антитеррористическая кампания в Афганистане в 2001 г. и операция «Шок и трепет» против Ирака в 2003 г.). Перечисленные военные действия (ВД) сопровождались интенсивными ракетно-бомбовыми ударами (РБУ) по ограниченным территориям в ограниченные промежутки времени.

Действие на атмосферу и геокосмос отдельного мощного взрыва сравнительно хорошо изучено. Комплексное исследование эффектов, сопутствующих мощному химическому взрыву, проведено в рамках специального проекта MACCA [4]. Реакция околоземной среды на массированные ракетно-бомбовые удары существенно отличается как от реакции на отдельный мощный взрыв, так от реакции на массированные ядерные удары в ходе ограниченной или всеобщей ядерной войны. Последствия ядерной войны тщательно моделировались многими исследователями [10, 18, 24, 34]. Лишь отдельные публикации посвящены эффектам в околоземной среде, последовавшим за военными действиями в

Ираке (1991 г.) и в Югославии (1999 г.) [1, 27]. В этих работах обсуждаются эффекты модификации атмосферы на ионосферных высотах (около 300 км). В работе [27] выдвинуто предположение, что возмущения от отдельных взрывов накапливаются с характерным временем около 14 дней. Возможными причинами этого могут быть накопление энергии акустико-гравитационных волн (АГВ) и засорение атмосферы пылью, а также аномальным рассеянием солнечного излучения на частицах пыли [27].

Целью настоящей работы является оценка на примере военных действий в Ираке физических и экологических эффектов в атмосфере, которые возникают в результате интенсивных ракетно-бомбовых ударов, пожаров на нефтепромыслах и в городах. Оценены энергетические характеристики процессов, массы выброшенных в атмосферу пыли, дыма и химических веществ, потоки энергии АГВ и сейсмических волн, возмущения электрических параметров атмосферы. Обсуждаются возможности проявления ряда вторичных процессов и оценивается их энергетика.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОЕННЫХ ДЕЙСТВИЯХ

По данным INTERNET (www.irak.ru, www.rambler.ru и др.) для военных действий антииракская коалиция во главе с США сформировала мощную группировку, включающую СБА (около 50 самолетов), ТПА (около 900 самолетов), АСН (более 70 самолетов), 6 авианосцев, 35 носителей крылатых ракет. Запас крылатых ракет составил более 1100 штук.

Война в Ираке началась 20 марта 2003 г. в 02:35 UT и продолжалась около трех недель. За первые две недели военных действий нанесено более сотни серий ракетно-бомбовых ударов. В среднем в одной серии принимало участие 1 или 2 стратегических бомбардировщика, до 20 самолетов ТПА и около 10 крылатых ракет. Самый мощный удар был нанесен 21 марта 2003 г. около 18 UT. К началу суток 22 марта по целям в Ираке было выпущено около 1000 крылатых ракет (это втрое больше чем за все время операции «Буря в пустыне»).

Для оценки энергетики взрывов будем исходить из того факта, что в течение первых двух недель войны к налетам было привлечено 150 самолетов СБА (10 единиц типа B-2A, 115 самолетов типа B-52H, 25 единиц типа B-1B) и около 1600 самолетов ТПА. Полагая, что самолеты B-2A, B-52H,

B-1B и ТПА имеют бомбовую нагрузку 23, 30, 61 и 5 т соответственно, получим суммарную массу сброшенных авиабомб около 12600 т. Здесь учтено, что 10 самолетов B-1B несли крылатых ракет общей численностью около 230 штук. Одна КР типа «Томагавк» имеет массу заряда 320...450 кг. Прием, что в среднем эта масса составляет 400 кг. Тысяча крылатых ракет доставила взрывчатых веществ (ВВ) около 400 т. Все авиабомбы содержали ВВ около 85 %, т. е. примерно 10700 т. Таким образом, суммарная масса ВВ составила около 11 кт, а за все время военных действий в Ираке она вряд ли превысила $m_{\Sigma} = 15$ кт. При удельном энерговыделении $\varepsilon_d = 4 \cdot 10^6$ Дж/кг ей соответствует суммарное энерговыделение $E_{\Sigma} = \varepsilon_d m_{\Sigma} \approx 6 \cdot 10^{13}$ Дж. Для сравнения укажем, что расход ВВ в течение первой и второй мировых войн приближался к 5 и 10 Мт соответственно.

Масса отдельной авиабомбы изменялась от одной до нескольких тонн. Нельзя исключить, что США использовали в ходе войны свою неядерную супербомбу массой 9761 кг (масса ВВ около 8172 кг).

Военные действия сопровождались полетами около 2000 самолетов (а значит инжекцией продуктов сгорания топлива и акустической энергии), мощными взрывами (более 10 тыс.), горением нефтяных скважин и хранилищ нефтепродуктов, а также пожарами в городах. Перечисленные процессы привели к определенным экологическим последствиям, которые обсуждаются ниже.

ЭФФЕКТЫ, ВЫЗВАННЫЕ ПОЛЕТАМИ САМОЛЕТОВ И КРЫЛАТЫХ РАКЕТ

Инжекция продуктов сгорания топлива. Общая мощность двигателей самолета СБА изменяется в пределах 10...40 МВт, масса топлива составляет 30...90 т при массе самолета около 180...220 т. Двигатели летательного аппарата ежесекундно расходуют 1...3 кг топлива. В среднем самолет находится в небе над Ираком в течение времени $\Delta t_1 \approx 1$ ч. При этом его двигателями инжектируется около 13...40 т продуктов сгорания топлива. За 150 самолетовылетов в небе над Ираком их масса составила 2...6 кт. С учетом времени нахождения самолетов СБА в воздухе, достигающем 30 ч, общая масса продуктов приблизилась к 60...180 кт.

Мощность двигателей самолета ТПА близка к 8...16 МВт. В небе над Ираком одним летательным аппаратом расходовалось около 3...7 т топлива и

выброшено в атмосферу около 11...25 т выхлопных газов. При 1600 самолетовылетах их масса составила 18...40 кт. Для сравнения укажем, что полет 1100 крылатых ракет сопровождался выбросом всего лишь 1000 т выхлопных газов.

Таким образом, полеты самолетов только за первые две недели войны привели к инжекции в атмосферу примерно 80...220 кт продуктов сгорания топлива. Горячие газы, конденсируясь, превращались в аэрозоли. Последние рассеивают и поглощают солнечное излучение, изменяя радиационный баланс на поверхности Земли. Кроме того, выхлопные газы реактивных самолетов способствуют разрушению озона.

Инжекция акустической энергии. В мощность акустических колебаний превращается около 10^{-4} от мощности реактивных двигателей. Для одного самолета СБА и ТПА она составляет 1...4 и 0.8...1.6 кВт соответственно. При полете самолета в течение 1 ч энергия акустических колебаний примерно равна 3.6...14.4 и 2.9...5.8 МДж соответственно. Для 150 самолетовылетов СБА энергия акустических колебаний в небе над Ираком достигала значений 0.5...2.2 ГДж. При продолжительности полетов в 30 ч эта энергия увеличилась до 15...65 ГДж.

Один самолет в небе над Ираком генерировал акустические колебания с мощностью около 0.8...1.6 кВт и энергий около 2.9...5.8 МДж. За 1600 самолетовылетов последняя увеличилась примерно до 4.6...9.2 ГДж. Добавим, что энергия акустических процессов, сопровождавшая полет 1100 крылатых ракет, не превышала 0.4 ГДж.

Таким образом, суммарная энергия акустических колебаний, вызванных полетами летательных аппаратов, в течение первых двух недель войны достигла значений 20...75 ГДж.

Частотный спектр акустического излучения реактивных двигателей достаточно широк. Спектральная мощность излучения достигает максимума на частоте f_m , которая зависит от диаметра сопла d_s и скорости истечения v_s продуктов сгорания, т. е. числа Струхала

$$St = \frac{v_s}{fd_s}.$$

На частоте f_m величина $St^{-1} = 0.13$ [17]. Отсюда

$$f_m = \frac{0.13v_s}{d_s}.$$

При $d_s = 0.1...0.3$ м и $v_s = 500...1000$ м/с имеем $f_m = 430...650$ Гц. При уменьшении f спектральная

плотность убывает пропорционально f^2 [17]. Например, на частоте 5 Гц она уменьшается в 10^4 раз. На столь низких частотах, по-видимому, более эффективным является излучение, обусловленное движением летательного аппарата, скорость которого v_1 и характерный размер l_1 :

$$f_m = \frac{v_1}{l_1} St^{-1}.$$

Полагая $l_1 = 10$ м, $St^{-1} = 0.1...1$, $v_1 = 300$ м/с, получим $f_m = 3...30$ Гц.

ЭФФЕКТЫ ВЗРЫВОВ

Химические взрывы сопровождаются весьма сложным и недостаточно изученным комплексом процессов: дроблением, нагревом и разлетом вещества, ионизацией продуктов взрыва, разделением электрических зарядов, генерацией квазистатических электрических и магнитных полей, генерацией радиоизлучения в широком диапазоне частот (примерно от единиц кГц до нескольких ГГц) и др. Результаты расчетов механических, электрических и акустических параметров взрывов с массой ВВ 0.1...10 т приведены в табл. 1, 2.

Параметры взрыва. Химический взрыв характеризуется кратковременностью ($\sim 10^{-6}...10^{-5}$ с) химических превращений вещества, большой скоростью детонации (2...9 км/с), высокой температурой (около 4000 К) и значительным давлением (около $4 \cdot 10^{10}$ Н/м²) продуктов взрыва [7, 19]. Расширение последних приводит к дроблению и разбрзгиванию вещества, на что уходит соответственно около 90...99 % и 1...10 % энергии взрыва $E_d = \varepsilon_d m_d$. Здесь $\varepsilon_d \approx 4 \cdot 10^6$ Дж/кг — удельное энерговыделение, а m_d — масса детонирующего заряда. Масса разрушенного вещества

$$m_1 = \frac{E_d}{\varepsilon} = m_d \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon},$$

где $\varepsilon = 5 \cdot 10^3...10^5$ Дж/кг — удельная энергия дробления. Очевидно, что

$$\frac{m_1}{m_d} = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon} = 40...800.$$

Выбросы вещества. Размеры комочеков (частиц) раздробленного вещества изменяются от 10^{-7} до 0.1 м. При этом их распределение по массам в широком диапазоне масс приближенно может считаться степенным:

Таблица 1. Зависимость основных параметров взрыва от массы ВВ

m_d, t	$E_d, \text{ГДж}$	$E_a, \text{ГДж}$	m_1, t	m_2, t	m_3, t	$h_c, \text{м}$	$q_e, \text{мКл}$	$h_0, \text{м}$	$E_{e0}, \text{МВ/м}$	$\tau_e, \text{с}$	$z_{tm}, \text{км}$	$f_1, \text{Гц}$	$f_2, \text{Гц}$	$f_m, \text{Гц}$
0.1	0.4	0.04	4...80	0.4...8	0.1...2	4.6	2	1.2	0.13	126	0.36	2.2	21.6	9.3
0.3	1.2	0.12	12...240	1.2...24	0.3...6	6.7	3.4	1.7	0.22	156	0.5	1.5	14.9	6.4
0.5	2	0.2	20...400	2...40	0.5...10	7.9	4.5	2.0	0.29	173	0.57	1.3	12.6	5.4
1	4	0.4	40...800	4...80	1...20	10	6.3	2.5	0.4	199	0.7	1	10	4.3
3	12	1.2	120...2400	12...240	3...60	14.4	11	3.6	0.7	248	0.95	0.7	7	3
5	20	2	200...4000	20...400	5...100	17.1	14	4.3	0.9	275	1.1	0.6	5.8	2.5
10	40	4	400...8000	40...800	10...200	21.5	20	5.4	1.3	315	1.3	0.5	4.7	2

Таблица 2. Зависимость основных параметров комочеков (пылинок) вещества, образованных взрывом, от их радиуса

$r, \text{м}$	$a_0, \text{м}/\text{с}^2$	$v_d, \text{м}/\text{с}$	$\tau_d, \text{с}$	$\Delta t_u, \text{с}$	$z_{mu}, \text{м}$	$\Delta t_d, \text{с}$
10^{-1}	0.3	110	11	2	19.7	1.4
10^{-2}	3.2	25	2.5	1.7	15.5	1.5
10^{-3}	32	11	1.1	1.2	8.8	1.8
10^{-4}	320	5.2	0.5	0.7	3.7	2.4
10^{-5}	$8 \cdot 10^3$	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-2}$	$5.2 \cdot 10^{-2}$	$3.8 \cdot 10^2$
10^{-6}	$8 \cdot 10^5$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-5}$	$2.9 \cdot 10^{-4}$	$5.2 \cdot 10^{-4}$	$3.8 \cdot 10^4$
10^{-7}	$8 \cdot 10^7$	$2.6 \cdot 10^{-6}$	$2.6 \cdot 10^{-7}$	$4.1 \cdot 10^{-6}$	$5.2 \cdot 10^{-6}$	$3.8 \cdot 10^6$
10^{-8}	$8 \cdot 10^9$	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$2.6 \cdot 10^{-9}$	$5.3 \cdot 10^{-8}$	$5.2 \cdot 10^{-8}$	$3.8 \cdot 10^8$

$$\Delta n = \frac{A}{m^\alpha} \Delta m,$$

где m — масса комочка, A и α — константы, Δn — число комочеков с массой от m до $m + \Delta m$. Обычно α близко к единице. Для дальнейшего представляется интерес знание суммарной массы частиц, называемых далее аэрозолями, с характерными размерами $10^{-7} \dots 10^{-6}$ м. Для этого диапазона распределение частиц по массам близко к логарифмически нормальному (см., например, [10, 18, 24]). Их масса m_2 составляет $10 \dots 15\%$ от массы m_1 . Такие частицы, попав в атмосферу, надолго в ней «зависают». Дело в том, что они движутся хаотически преимущественно со средней квадратичной скоростью броуновских частиц

$$v_B = \sqrt{\frac{3kT}{m_p}} = \sqrt{\frac{9kT}{4\pi r^3 \rho_p}} \approx \sqrt{\frac{kT}{r^3 \rho_p}},$$

где T — температура атмосферного газа, k — постоянная Больцмана, r и m_p — радиус и масса частицы, ρ_p — ее объемная плотность. При $T \approx 300$ К, $\rho_p \approx 10^3$ кг/м³, $r = 10^{-7} \dots 10^{-6}$ м имеем $v =$

$= 10^{-3} \dots 10^{-1}$ м/с. Скорость направленного вниз движения (оседания) частиц для тех же значений r составляет $3 \cdot 10^{-6} \dots 3 \cdot 10^{-4}$ м/с.

Забрасыванию аэрозолей на достаточно большие высоты (вплоть до стратосферы) способствует конвекция и атмосферная турбулентность. Далее считается, что полная масса заброшенных частиц $m_3 = m_2/4$. Выбросы пыли существенны лишь в случае, когда взрыв приповерхностный и не сильно углубленный. При глубине взрыва h_d , превышающей глубину камуфлетного взрыва h_c , выбросы отсутствуют. Величину h_c можно оценить из следующих соображений. Давление продуктов взрыва до начала разлета газов дается соотношением [7]

$$\Delta p_m = (\gamma - 1) \rho_d \epsilon_d = (\gamma - 1) \frac{3}{4\pi} \frac{\epsilon_d m_d}{R_d^3},$$

где $\rho_d \approx 1.6 \cdot 10^3$ кг/м³ — плотность взрывчатых веществ, R_d — радиус ВВ, $\gamma = 3$ — показатель изоэнтропы. Давление продуктов взрыва на расстоянии R для камуфлетного взрыва не должно превышать прочность вещества σ_m , т. е.

$$\Delta p = \Delta p_m \frac{R_0^3}{R^3} \leq \frac{\sigma_m}{k_p},$$

где $k_p > 1$ — коэффициент запаса прочности. При $\Delta p = \sigma_m/k_p$ имеем $R = h_c$. Отсюда

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{3k_p(\gamma - 1)}{4\pi} \frac{\varepsilon_d m_d}{\sigma_m}}.$$

При $k_p = 2$ получим

$$h_c \approx \sqrt[3]{\frac{\varepsilon_d m_d}{\sigma_m}}.$$

Величина σ_m зависит от вида вещества. Например, для песка $\sigma_m \approx 4 \cdot 10^5$ Н/м², а для гранита — около $4 \cdot 10^6$ Н/м². Для $\sigma_m \approx 4 \cdot 10^5 \dots 4 \cdot 10^6$ Н/м², $\varepsilon_d = 4 \cdot 10^6$ Дж/кг имеем $h_c \approx (1 \dots 2)m_d^{1/3}$, где h_c и m_d измеряются в метрах и килограммах. В работе [2] приводится близкое к нашему соотношение: $h_c \approx (2 \dots 2.5)m_d^{1/3}$. При взрывах в городских условиях будем полагать $h_c \approx m_d^{1/3}$.

Добавим, что начальная скорость v_0 комочеков вещества составляет несколько десятков метров за секунду. Она слабо зависит от энергии ВВ, потому что с увеличением E_d увеличивается и масса выбрасываемого вещества. Далее для оценок будем полагать, что $v_0 = 20$ м/с. Максимальная высота z_m подъема комочеков вещества зависит от величины v_0 и сопротивления воздуха. Обычно $z_m \approx 10 \dots 20$ м при $v_0 \approx 15 \dots 20$ м/с. При этом время подъема комочеков и пыли существенно зависит от радиуса r . Время опускания мелкой пыли может быть значительно больше (см. табл. 2).

Рассмотрим подробнее механику раздробленного вещества. Уравнение движения комочка или частицы радиусом r и массой m имеет вид

$$m \frac{dv}{dr} = -mg - F_r,$$

$$v|_{t=0} = v_0,$$

где v — скорость объекта при разлете, g — ускорение свободного падения, F_r — сила сопротивления. Вид последней зависит от скорости v или числа Рейнольдса $Re = \rho v r / \eta$, где ρ — плотность воздуха, η — коэффициент динамической вязкости атмосферного газа. При достаточно малых и сравнительно больших скоростях движения выражение для F_r имеет известный вид [20]:

$$F_{r1} = 6\pi\eta vr,$$

$$F_{r2} = \frac{C}{2} \pi \rho v^2 r^2,$$

где C — коэффициент аэродинамического сопротивления (далее для шара полагается $C \approx 1/3$), $\rho \approx 1.3$ кг/м³ — плотность воздуха у поверхности Земли. Силы $F_{r1,2}$ сообщают объекту отрицательные ускорения (т. е. торможения), модули которых равны

$$a_1 = \frac{9}{2} \frac{\eta v}{\rho_p r^2},$$

$$a_2 = \frac{1}{8} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{v^2}{r}.$$

Максимальное значение торможения a_0 имеет место в момент начала разлета, когда скорость частиц равна v_0 . Из условия $a_1 = a_2$ получаем критический радиус частицы

$$r_0 = \frac{36\eta}{\rho v}.$$

При $v = 20$ м/с и $\eta = 1.7 \cdot 10^{-5}$ Па·с имеем $r_0 \approx 24$ мкм. При $r < r_0$ на частицу действует сила F_1 , а при $r > r_0$ — сила F_2 . Решение уравнения движения для этих случаев имеет вид

$$v = v_1 [(1 + b_1)e^{-\tau_1} - 1], \quad (1)$$

$$v = v_2 \frac{b_2 - \operatorname{tg}\tau_2}{1 + b_2 \operatorname{tg}\tau_2}, \quad (2)$$

где $\tau_1 = gt/v_1$, $\tau_2 = gt/v_2$, $b_1 = v_0/v_1$, $b_2 = v_0/v_2$. Характерные скорости

$$v_1 = \frac{2\rho_p gr^2}{9\eta},$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{8\rho_p gr}{\rho}}$$

равны установившимся скоростям падения комочеков (частиц) под действием силы тяжести. Время становления этих скоростей $\tau_{d1,2} = v_{1,2}/g$.

Время подъема находится из уравнений (1) и (2) при условии, что $v = 0$:

$$t_{01} \approx \tau_{d1} \ln(1 + b_1),$$

$$t_{02} \approx \tau_{d2} \operatorname{arctg} b_2.$$

Временная зависимость высоты подъема частиц радиусом $r < r_0$ находится интегрированием соотношения (1) при $z_1|_{t=0} = 0$:

$$z_1 = z_{10}[(1 + b_1)(1 - e^{-\tau_1}) - \tau_1],$$

$$z_{10} = \frac{v_1^2}{g},$$

Для нахождения максимальной высоты подъема учтем, что $t = t_{01}$ и $gt_0/v_1 \gg 1$. Тогда

$$z_{1m} = z_{10}[(1 + b_1) - \ln(1 + b_1)].$$

Поскольку $b_1 \gg 1$ и $b_1 \gg \ln b_1$,

$$z_{1m} \approx \frac{v_1 v_0}{g} = \frac{2v_1}{v_0} z_m,$$

где $z_m = v_0^2/(2g)$ — максимальная высота подъема частиц при отсутствии сопротивления воздуха.

Для объектов радиусом $r > r_0$, интегрируя выражение (2) при нулевом начальном условии, получаем

$$z_2 = z_{20} \left[\ln(1 + b_2 \operatorname{tg} \tau_2) - \frac{1}{2} \ln(1 + \operatorname{tg}^2 \tau_2) \right], \quad (3)$$

где $z_{20} = v_2^2/g$.

Максимальная высота подъема имеет место при $\operatorname{tg} \tau_2 = b_2$:

$$z_{2m} = \frac{1}{2} z_{20} \ln(1 + b_2^2) \quad (4)$$

или

$$z_{2m} = z_m \frac{\ln(1 + b_2^2)}{b_2^2}. \quad (4a)$$

Для объектов радиусом $r > 10$ см при $v_0 \sim 10$ м/с имеем $b_2 \ll 1$, $\operatorname{tg}^2 \tau_2 \ll 1$, и соотношения (3) и (4a) упрощаются:

$$z_2 \approx z_{20} \left(b_2 \operatorname{tg} \tau_2 - \frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \tau_2 \right),$$

$$z_{2m} \approx z_m.$$

Учитывая, что $\operatorname{tg} \tau_2 \leq b_2 \ll 1$, положим $\operatorname{tg} \tau_2 \approx \tau_2$. Тогда

$$z_2 \approx z_{20} \left(b_2 \tau_2 - \frac{\tau_2^2}{2} \right) = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2.$$

Это выражение совпадает с соответствующим выражением для высоты подъема тела в свободном пространстве. Таким образом, для комочеков вещества радиусом $r > 10$ см при скоростях $v_0 \sim 10$ м/с влиянием воздуха можно пренебречь.

Рассмотрим кратко падение комочеков и пыли. При $r < 1$ мм $F_r \approx F_{r1}$, и скорость падения описывается следующим соотношением:

$$v = v_1(1 - e^{-\tau_1}).$$

Если $\tau_1 \gg 1$, скорость практически стационарна, т. е. $v \approx v_1$. При $r < 1$ мм высота частиц

$$z = z_m - v_1 t + z_{10}(1 - e^{-\tau_1}),$$

$$z_{10} = \frac{v_1^2}{g},$$

где z_m — максимальная высота подъема пыли. Время ее опускания Δt_d находится из данного соотношения при условии $z = 0$. В частности, при $\tau_1 \gg 1$ (т. е. при $r < 0.1$ мм) $\Delta t_d \approx z_m/v_1$.

Для комочеков радиусом $r > 1$ мм скорость падения $v = v_2 \operatorname{th} \tau_2$. Временная зависимость их высоты

$$z = z_{2m} - z_{20} \ln \operatorname{th} \tau_2.$$

Время падения находится из условия $z = 0$:

$$\Delta t_d = \tau_{d2} \operatorname{arch} \exp \frac{\ln(1 + b_2^2)}{2}.$$

При $b_2^2 \gg 1$, т. е. при $r > 10$ см, имеем $\Delta t_d \approx v_0/g$. При этом сопротивление воздуха малосущественно.

Результаты расчета параметров комочеков (частиц) приведены в табл. 2. Считалось, что $v_0 = 20$ м/с, $\rho_p = 2 \cdot 10^3$ кг/м³. Из нее видно, что торможение частиц воздухом становится существенным при $r = 10^{-2}$ мм, (торможение $a_0 \approx g$), а при $r < 1$ мм — определяющим ($a_0 \gg g$). Скорость падения объектов $v_d = v_{1,2}$ быстро уменьшается с уменьшением r (см. табл. 2). Из-за увеличения сопротивления воздуха максимальная высота $z_{mu} = z_{1,2m}$, и время подъема $\Delta t_u = t_{01,02}$ уменьшается по мере уменьшения r . Высота подъема пылинок радиусом $r < 10^{-6}$ м меньше 1 см. По этой причине мелкие пылинки в облаке взрыва отсутствовали бы, если бы они не образовывались в процессе разлета вещества. Кроме того, подъему частиц способствует разлет продуктов взрыва. Действительно, при воздушном или наземном взрыве избыточное давление $\Delta p = \Delta p_m R_d^3/R^3 \approx E_d/(2R^3)$ равно атмосферному давлению p_0 на расстоянии $R_{ch} = (E_d/2p_0)^{1/3}$. При $E_d = 4 \cdot 10^8 \dots 4 \cdot 10^{10}$ Дж ($m_d = 0.1 \dots 10$ т) значение $R_{ch} \approx 13 \dots 59$ м. Естественно, что по мере увеличения глубины взрыва величина R_{ch} уменьшается. Для камуфлетного взрыва $R_{ch} = 0$.

При максимальной высоте подъема комочеков и пылинок $z_m \approx 10$ м время их падения Δt_d увеличи-

вается примерно от 1 до 10^8 с при изменении r от 10^{-1} до 10^{-8} м.

Оценим суммарную массу разрушенного и выброшенного вещества. Положим, что при взрыве 1 т взрывчатых веществ в среднем разрушается около 200 т вещества. При этом образуется масса пыли около 20 т, и примерно 5 т этой пыли забрасывается воздушными потоками на большие высоты (вплоть до стратосферы). При суммарной массе ВВ в 15 кт получим массу заброшенной пыли $m_{3\Sigma} \approx 75$ кт. Масса разрушенного вещества составила около 3 Мт, а его объем — порядка 10^6 м³.

Приведенные значения масс и объема полезно сравнить с аналогичными характеристиками выбросов вулканов. Например, при извержении сильнейших вулканов Тамбора (1815 г.) и Кракатау (1883 г.) объемы выброшенного в атмосферу пепла и газов составили около 150 и 18 км³. Им соответствовали массы порядка 10^{14} и 10^{13} кг. Поэтому выбросы пыли в ходе военных действий в Ираке были эквивалентны извержению среднего вулкана и не могли вызвать глобальные экологические последствия. Локальные эффекты были весьма существенными (см. ниже).

Электрические процессы. В очаге взрыва энергично протекают электромагнитные процессы. Об этом свидетельствует генерация квазистатических полей и радиоизлучения в широком диапазоне частот [2, 3, 8, 9, 31, 32]. Дело в том, что продукты взрыва представляют собой относительно высокотемпературную ($T \approx 4000$ К) газово-пылевую плазму с концентрацией заряженных частиц $N = 10^{24} \dots 10^{26}$ м⁻³ [10]. Степень ионизации $s_i = N/N_n \approx 2 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-5}$ ($N_n \approx 5 \cdot 10^{28}$ м⁻³ — концентрация нейтральных частиц). Плазменные процессы, по-видимому, и порождают большинство электромагнитных явлений. В свою очередь, причиной ионизации являются увеличение плотности продуктов взрыва при детонации (от $1.6 \cdot 10^3$ до $2.7 \cdot 10^3$ кг/м³), высокие температуры, наличие во взрывчатом веществе примесей с низким потенциалом ионизации ε_i и др. Так, только за счет термической ионизации при $\varepsilon_i = 5, 8$ и 12 эВ имеем соответственно $s_i \sim 10^{-4}, 10^{-6}$ и 10^{-8} ($N \sim 10^{25}, 10^{23}$ и 10^{20} м⁻³). За генерацию квазистатических полей ответственны процессы разделения заряда. Им предшествуют такие механоэлектрические явления как ударная поляризация, пьезоэффект, движение заряженных дислокаций, электризация при трении, разрушение и т. п.

Генерация возмущений электрического поля

$E_e(t)$ атмосферы при подземных взрывах рассмотрена в работах [2, 3, 31, 32]. Генерация подобных возмущений в условиях попадания высокоточного оружия в сооружения до настоящего времени, по-видимому, не изучалась. Будем полагать, что при разрушении городских построек и бомбоубежищ проникающими боевыми частями разрушения и выбросы вещества в первом приближении подобны тем, что имеют место при подземных взрывах. Следует ожидать, что в результате взрыва частицы разрушенного вещества заряжаются отрицательно, а газообразные продукты взрыва — положительно [2]. Форма $E_e(t)$ существенно зависит от вида разрушающего вещества, его влажности, скорости ветра и т. д. В любом случае импульс $E_e(t)$, по-видимому, будет двухполярным с сопоставимыми по величине амплитудами E_{e0} . Появление отрицательного всплеска $E_e(t)$ обусловлено возникновением и развитием купола в ближней зоне взрыва. Длительность этого процесса порядка времени подъема частиц вещества $\Delta t_u \approx 1$ с (табл. 2). После оседания купола в воздухе остаются положительно заряженные продукты взрыва и возникает положительный всплеск электрического поля. Продолжительность τ_e этого процесса можно оценить по эмпирической формуле [2]:

$$\tau_e = 50 m_d^{0.2},$$

(время — в секундах, масса — в килограммах). Из табл. 1 видно, что τ_e составляет несколько сотен секунд.

Величину положительного и отрицательного зарядов (они близки между собой в силу закона сохранения заряда) оценим так [2]:

$$q_e = k_e m_d^{0.5}$$

(заряд — в кулонах, масса — в килограммах). Величина k_e зависит от глубины взрыва, особенностей разрушающего объекта. Примем для оценок, что $k_e = 2 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг^{1/2}. Это справедливо для подземных взрывов при оптимальной глубине взрыва h_0 , обеспечивающей максимальную высоту подъема грунта. Для h_0 справедлива формула [2]

$$h_0 = k_h m_d^{1/3}, \quad k_h = 0.2 \dots 0.3$$

(глубина — в метрах, масса — в килограммах). При оценках h_0 принималось, что $k_h = 0.25$. Величина h_0 изменяется в пределах 1...5 м при $m_d = 0.1 \dots 10$ т (см. табл. 1). Можно надеяться, что она будет того же порядка и при взрывах проникающих боевых частей.

Значения $\Delta t_u \approx 1$ с и $\tau_e \sim 100$ с свидетельствуют,

что возникающие возмущения электрического поля атмосферы являются квазистатическими. Поэтому для оценки амплитуды E_{e0} воспользуемся соотношением из электростатики, считая землю идеальным проводником. Для вертикальной составляющей E_{e0} имеем

$$E_{e0} = \frac{qH}{2\pi\epsilon_0(R^2 + H^2)^{3/2}},$$

где H — эффективная высота расположения электрического заряда q , R — расстояние от эпицентра взрыва до места наблюдения, ϵ_0 — электрическая постоянная. Полагая $R = H = 10$ м, получим значение $E_{e0} \approx 10^5 \dots 10^6$ В/м для $q \approx 10^{-3} \dots 10^{-2}$ Кл (см. табл. 1). Естественно, что с увеличением R поле $E_{e0} \propto R^{-2}$ при $R \gg H$.

Реально величина H на более поздних стадиях взрыва может быть существенно больше. Дело в том, что горячие продукты взрыва (так называемый термик), заряженные положительно, всплывают и достигают максимальной высоты [22]

$$z_{tm} \approx 110m_d^{1/3} \ln \frac{575}{m_d^{1/3}}$$

(высота — в метрах, масса — в тоннах). Из табл. 1 видно, что высота термика достигает значений от нескольких сотен до 1300 м. При $R = H = 1000$ м имеем $E_{e0} \approx 1 \dots 10$ В/м для тех же значений q .

Можно показать, что радиус всплывающего газового пузыря приближенно описывается соотношением

$$R_0 = \sqrt[3]{\alpha_p \frac{E_d}{p_0}} = \sqrt[3]{\alpha_p \frac{\epsilon_p m_p}{p_0}},$$

где $\alpha_p = 3\eta_b / 14\pi\gamma_a$, η_b — доля энергии взрыва, преобразуемая во внутреннюю энергию газа внутри пузыря, γ_a — показатель адиабаты, p_0 — давление атмосферного газа. Для воздушных взрывов $\eta_b = 1$, $\gamma_a = 1.4$, и справедлива расчетная формула

$$R_0 \approx 1.3\sqrt[3]{m_d},$$

где R_0 — в метрах, m_d — в килограммах. При $m = 0.1 \dots 10$ т имеем $R_0 \approx 6 \dots 27$ м. При подземных взрывах и взрывах глубоко проникающих боеголовок η_b существенно меньше ($\sim 0.01 \dots 0.1$), уменьшается при этом и R_0 .

Установившаяся скорость подъема пузыря оценивается из соотношения

$$v_b = \sqrt{k_b g R_0},$$

где k_b — безразмерный коэффициент, зависящий от ρ/ρ_0 и относительной массы холодного воздуха, присоединенной к пузырю. Обычно $k_b \approx 0.1 \dots 1$. Тогда при $R_0 = 10$ м скорость $v_b \approx 3 \dots 10$ м/с. Время достижения установившейся скорости $\tau_b \approx v_b/g \approx 0.3 \dots 1$ с, а время подъема на высоту z_{tm} порядка z_{tm}/v_b , что составляет несколько минут.

Акустические процессы. Взрывы сопровождались выделением акустической энергии E_a . При воздушных взрывах практически вся энергия взрывчатого вещества преобразуется в энергию ударных волн и, в конечном счете, в энергию акустических волн. При бомбардировке городов с использованием высокоточного оружия разрушению подлежали в основном здания, бомбоубежища и другие постройки. Для этого использовались как глубокопроникающие головные части крылатых ракет, так и проникающие авиабомбы. В этих случаях почти вся энергия взрывчатого вещества расходилась на разрушение построек. В энергию акустических волн преобразовалось, по-видимому, около 1—10 % энергии ВВ, доставляемых крылатыми ракетами и авиабомбами соответственно. При коэффициенте преобразования $\eta_a = 10$ % и суммарном энерговыделении $E_\Sigma = 6 \cdot 10^{13}$ Дж имеем $E_{a\Sigma} \approx 6 \cdot 10^{12}$ Дж. При ракетно-бомбовом ударе наибольшей интенсивности, который продолжался в течение времени $\Delta t \approx 1$ ч, величина E_a составляла около 10^{12} Дж, а средняя мощность акустических возмущений — $P_a \approx 0.3$ ГВт.

Рассмотрим спектральное распределение акустической энергии взрыва. Можно показать [15], что при воздушных взрывах около 80 % энергии E_a содержится в диапазоне частот от f_1 до f_2 , где

$$f_1 \approx m_d^{-1/3},$$

$$f_2 \approx 10m_d^{-1/3}.$$

Здесь масса в тоннах, частота в герцах. Максимум спектрального распределения E_a приходится на частоту

$$f_m \approx 4.3m_d^{-1/3}.$$

Результаты оценок $f_{1,2}$ и f_m приведены в табл. 1. Видно, что $f_m \approx 2 \dots 10$ Гц. Будем полагать, что приведенные оценки грубо справедливы и при взрывах в условиях города.

Сейсмические процессы. Известно, что при землетрясениях и подземных ядерных взрывах в энергию сейсмических волн преобразуется около 1 %

Таблица 3. Зависимость основных параметров излучения электромагнитной бомбы от расстояния

$R, \text{ км}$	$N_r, \text{ мкВт/Гц}$	$E_0, \text{ В/м}$	$\Pi_E, \text{ мкДж/м}^2$	$E_r, \text{ мкДж}$	$\Pi_P, \text{ Вт/м}^2$	$\Pi_{P1}, \text{ Вт/м}^2$
0.03	400	46000	350	3500	88000	35
0.1	36	7700	32	320	8000	3.2
0.3	4	4600	3.5	35	880	0.35
1	0.36	770	0.32	3.2	80	0.032
3	0.04	460	0.035	0.35	8.8	$3.5 \cdot 10^{-3}$
10	$3.6 \cdot 10^{-3}$	77	$3.2 \cdot 10^{-3}$	0.032	0.8	$3.2 \cdot 10^{-4}$
30	$4 \cdot 10^{-4}$	46	$3.5 \cdot 10^{-4}$	$3.5 \cdot 10^{-3}$	0.088	$3.5 \cdot 10^{-5}$
100	$3.6 \cdot 10^{-5}$	7.7	$3.2 \cdot 10^{-5}$	$3.2 \cdot 10^{-4}$	0.008	$3.2 \cdot 10^{-6}$

энергии источника сейсмических возмущений. Будем считать, что при наземных и углубленных взрывах коэффициент преобразования η_s того же порядка. При взрыве авиабомбы с $m_d = 10$ т высвобождается энергия $E_d = 4 \cdot 10^{10}$ Дж, а энергия сейсмических волн E_s оценивается в $4 \cdot 10^8$ Дж. При интенсивном ракетно-бомбовом ударе $E_\Sigma \approx 10^{13}$ Дж, $\Delta t \approx 1$ ч. Тогда $E_\Sigma \approx 10^{11}$ Дж, а средняя мощность $P_s \approx 30$ МВт. Суммарная сейсмическая энергия, произведенная взрывами в течении всей операции «Шок и трепет», составила около $6 \cdot 10^{11}$ Дж. Средняя мощность при $\Delta t \approx 10$ сут равнялась 0.6 МВт.

Эффекты взрыва электромагнитной бомбы. 26 марта 2003 г. над Ираком впервые в боевых условиях применена СВЧ-бомба. Ее также называют электромагнитной (Е-бомбой). Принцип действия такой бомбы заключается в преобразовании части энергии ударной волны (продуктов взрыва ВВ) в энергию сверхвысокочастотного излучения. Ориентировочные параметры бомбы следующие: мощность СВЧ-излучения P — около 10 ГВт, длительность импульса τ — несколько долей наносекунд, ширина спектра излучения Δf — несколько гигагерц. Ниже для оценок полагалось, что $P = 10$ ГВт, $\tau = 0.4$ нс, $\Delta f = \tau^{-1} = 2.5$ ГГц. При этом энергия излучения $E_{\text{em}} = Pt = 4$ Дж. Если принять, что масса ВВ составляла 1 кг, а его энерговыделение $E_d = 4 \cdot 10^6$ Дж, при длительности химических превращений около $4 \cdot 10^{-6}$ с средняя мощность заряда близка к 10^3 ГВт. Это означает, что к.п.д. Е-бомбы порядка 1 %. В то же время $E_{\text{em}}/E_d = 10^{-6}$.

На расстоянии R от места взрыва поток энергии электромагнитного излучения $\Pi_E = E_{\text{em}}/4\pi R^2$. Спектральная плотность излучения $N_{r0} = P/\Delta f$

$= Pt = E_{\text{em}} = 4$ Вт/Гц (спектральная плотность фонового излучения в диапазоне 1...10 ГГц близка к 10^{-20} Вт/Гц). Амплитуда электромагнитного поля дается соотношением (в системе СИ)

$$E_0 = \frac{\sqrt{60P}}{R}.$$

Результаты оценок основных параметров радиоизлучения приведены в табл. 3. Здесь $N_r = N_{r0}(R_0/R)^2$, где R_0 — характерный размер излучателя, который примерно равен размеру бомбы (несколько дециметров). Для определенности считалось, что $R_0 = 0.3$ м. В табл. 3 также приведены оценки энергии СВЧ-излучения E_r в месте поражения цели (например, радиотехнической системы). Величина $E_r = \Pi_E S_a$, где S_a — эффективная площадь антенны (собирателя энергии излучения). При расчетах принималось, что $S_a = 10 \text{ м}^2$. Полученные значения E_r необходимо сравнить со значениями минимальной энергии E_{min} , достаточной для повреждения радиоэлектронной аппаратуры. Последняя зависит от диапазона частот, технологии изготовления, степени миниатюризации, используемых материалов и т. д. Оказывается, что микроволновые диоды, триоды, интегральные микросхемы и чувствительные элементы компьютеров под действием одиночного импульса выходят из строя при $E_{\text{min}} \approx 10^{-8} \dots 10^{-6}$ Дж [6, 21, 23, 29]. Таким образом, поражение радиоэлектронной аппаратуры излучением СВЧ-бомбы возможно на расстояниях $R_{\text{max}} \approx 2 \dots 20$ км при $E_{\text{min}} \approx 10^{-6} \dots 10^{-8}$ Дж соответственно. Если диаграмма направленности антенны радиоэлектронной системы не направлена на точку подрыва СВЧ-бомбы, воздействие на систему возможно лишь за счет приема излучения боковыми

лепестками. Уровень последних обычно ниже 20 дБ. При этом $R_{\max} \approx 0.2...2$ км. Добавим, что в ряде случаев влияние электромагнитных полей на электронные приборы становится существенным при напряженностях около 1 В/м [37].

ЭФФЕКТЫ СИЛЬНЫХ ПОЖАРОВ

Военные действия сопровождались возникновением городских пожаров, горением нефтяных скважин и нефтехранилищ. Рассмотрим эти процессы подробнее.

Городские пожары. Поскольку союзники по антииракской коалиции наносили точечные удары по городам, горели лишь отдельные дома и постройки. Крупномасштабные городские пожары, по-видимому, не наблюдались. Рассмотрим горение отдельного здания. Параметры пожара зависят от площади и высоты сооружения, его насыщенности горючими материалами. В центре современного крупного города удельная масса этих материалов приближается к $\tilde{m} = 470$ кг/м², а на его окраинах $\tilde{m} = 5...10$ кг/м² [24]. Далее принимается среднее значение $\tilde{m} = 100$ кг/м². Тогда при городских пожарах средний поток тепла Π_T и средний поток мощности $\Pi_p = \Pi_T/\Delta t$, где Δt — продолжительность горения, составляют

$$\Pi_T = \varepsilon_T \tilde{m},$$

$$\Pi_p = \frac{\varepsilon_T \tilde{m}}{\Delta t}.$$

При средней продолжительности горения $\Delta t = 1$ сут и удельной теплоте сгорания $\varepsilon_T = 4 \cdot 10^7$ Дж/кг получим $\Pi_T \approx 4 \cdot 10^9$ Дж/м², $\Pi_p = 4 \cdot 10^4$ Вт/м². Таких значений Π_p достаточно для возникновения интенсивной конвекции продуктов сгорания и огненных смерчей, которые развиваются

при $\Pi_p > \Pi_{p\min} \approx 10^4$ Вт/м² [24]. При пожарах в Ираке такие процессы, скорее всего, не наблюдались, так как горение внутренних частей построек происходило без достаточного подвода кислорода. Горение, судя по всему, было сравнительно медленным и часто сменялось тлением. Это способствовало выделению большого количества сажи С и угарного газа CO. Можно полагать, что масса CO составляла около 10 % массы горевшего вещества [24]. Масса сажи и углеводородов при этом была близка к 5 и 0.5 % от массы горючих материалов соответственно [24].

Результаты расчета параметров отдельных городских пожаров в зависимости от их площади S приведены в табл. 4. Указаны масса горючих материалов m_1 , масса дыма $m_2 = 0.1m_1$, выделившееся количество теплоты Q , мощность пожаров P (при $\Delta t = 10^5$ с), максимальная высота термика z_{tm} и мощность акустического излучения $P_a = \eta_a P$ (принималось, что $\eta_a = 0.3$ % [12, 13, 30]).

Оценим далее суммарный эффект от многих пожаров. Их общее число n точно неизвестно. Похоже, что оно составляло несколько сотен. Примем для оценок $n = 300$. Считаем, что средний пожар имел площадь около 300 м². Тогда масса горевшего вещества $m_{1\Sigma} \approx 10^4$ т, масса дыма $m_{2\Sigma} \approx 10^3$ т, $Q_\Sigma \approx 400$ ТДж, $P_\Sigma \approx 4$ ГВт, $P_{a\Sigma} \approx 10$ МВт. В дыме содержалось до 50 %, т. е. около 500 т углерода, который эффективно поглощает солнечное излучение. Кроме того, при горении полимеров массой около $5 \cdot 10^3$ т в атмосферу выброшено около 250 т аэрозолей, пиротоксинов и других вредных химических веществ.

Пожары сопровождаются генерацией АГВ в широком диапазоне частот f . Механизмы генерации изучены недостаточно [11—14, 30]). Ниже рассматриваются такие механизмы: генерация АГВ на собственных частотах атмосферы, срыв вихрей при

Таблица 4. Зависимость основных параметров городских пожаров от их площади. Средняя продолжительность пожара — 1 сут

$S, \text{м}^2$	$m_1, \text{т}$	$m_2, \text{т}$	$m_3, \text{т}$	$Q, \text{ТДж}$	$P, \text{МВт}$	$z_{tm}, \text{м}$	$P_a, \text{кВт}$	$F_r, \text{Гц}$	$f_p, \text{Гц}$
10	1	0.1	0.05	0.04	0.4	200	1.2	0.3	3.2
30	3	0.3	0.15	0.12	1.2	260	3.6	0.2	1.8
100	10	1	0.5	0.4	4	350	12	0.1	1
300	30	3	1.5	1.2	12	470	36	0.058	0.5
1000	100	10	5	4	40	630	120	0.032	0.3
3000	300	30	15	12	120	830	360	0.018	0.2
10000	1000	100	50	40	400	1100	1200	0.01	0.1

обтекании ветром пламени (или термика) и турбулентность. В целом спектр колебаний похож на спектр шумоподобного процесса. Но в нем есть также выделенные спектральные составляющие. Прежде всего к ним относятся собственные частоты атмосферы:

$$\omega_a = \sqrt{\frac{\gamma_a g}{4H_a} \left(1 - \frac{H_a}{H_T}\right)},$$

$$\omega_b = \sqrt{\frac{g}{H_a} \left(\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a} - \frac{H_a}{H_T}\right)},$$

где $H_a \approx 8$ км — приведенная высота атмосферы, $\gamma_a = 1.4$ — отношение удельных теплоемкостей (показатель адиабаты), $H_T = -T_a dz/dT_a$ — масштаб изменения температуры атмосферы T_a (при $dT_a/dz = -6$ К/км $H_T \approx 5$ км). Оценки дают $\omega_a \approx 1.9 \cdot 10^{-2}$ с, $\omega_b = 1.2 \cdot 10^{-2}$ с. При этом $f_a = \omega_a/2\pi \approx 3 \cdot 10^{-3}$ Гц, $f_b = \omega_b/2\pi \approx 1.9 \cdot 10^{-3}$ Гц. Им соответствуют периоды колебаний около 330 и 520 с.

Для низкочастотных АГВ, называемых внутренними гравитационными волнами (ВГВ), частота $f < f_b$, а для акустических — $f > f_b$.

Кроме периодов колебаний, связанных с собственными частотами, следует ожидать появления в спектре периодов колебаний, вызванных обтеканием ветра поверхности огненного факела или термика. Если боковую поверхность последних принять цилиндрической, условием срыва вихрей есть $St \approx 4.76$. Отсюда [13]:

$$f_r = \frac{w}{d} St^{-1} \approx 0.21 \frac{w}{d}, \quad (5)$$

где w — скорость ветра, $d \approx \sqrt{S}$ — диаметр пламени или термика, S — их площадь поперечного сечения. Например, при средней скорости ветра $w = 5$ м/с, $d = 1...10^3$ м, $f_r \approx 1...10^{-3}$ Гц (см. табл. 4).

При излучении акустических колебаний турбулентными образованиями с внешним (основным) масштабом L_0 в спектре преобладают частоты $f_t \approx v/L_0$, где v — средняя скорость движения турбулентного потока, $L_0 \approx d \approx \sqrt{S}$. При этом

$$f_t \approx \frac{v}{\sqrt{S}} \approx \frac{v}{d}. \quad (6)$$

Величина v зависит от масштаба и интенсивности пожара и изменяется в пределах 1—80 м/с. Например, при $v = 10$ м/с и $d = 1...10^3$ м $f_t \approx 10...10^{-2}$ Гц (см. табл. 4).

Горение нефтяных скважин. На территории Ирака имеется 1500 нефтяных скважин, 50 из них были подожжены в ходе военных действий. Возникли внушительные пожары, параметры которых зависят от избыточного давления Δp нефти в скважине и ее плотности $\tilde{\rho}$. Максимальная высота нефтяной струи при отсутствии воздуха равнялась бы

$$h_m = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{\Delta p}{\tilde{\rho}g},$$

где v_0 — начальная скорость струи. Наличие воздуха, уширение и распыление струи приводят к уменьшению высоты нефтяного фонтана до значения h_1 . Для оценок примем, что $h_1 = 3h_m/4$. Расход нефти dm/dt зависит от плотности нефти, начальной скорости струи и сечения изливающей трубы S_0 , которая принималась равной 0.03 м². После поджога нефтяной скважины высота пламени достигла величины $h = h_1 + h_2$, где h_2 — максимальная высота пламени при горении наземного источника. Высоту h_2 можно оценить по формуле [14]

$$h_2 = \tilde{\kappa} \dot{V}^{3/5} \Pi^{-1/5},$$

где $\dot{V} = dV/dt = vS/(2\pi)$, $v = 0.56$ м/с — скорость оттока продуктов из зоны горения, S — площадь пожара, $\Pi = gV\Delta\rho/\rho_0$, $\tilde{\kappa} \approx 8.3$ (для нефти), $\Delta\rho/\rho_0 \approx 0.81$, $\Delta\rho = \rho - \rho_0$, ρ и ρ_0 — плотности нагретого и невозмущенного воздуха.

Площадь пожара $S = \pi d^2/4$ оценивалась по его диаметру d . Считалось, что $d = 0.4h = 0.3h_m$. Площадь пламени S_f состоит из площади верхнего купола $2S$ и площади боковой поверхности огненного факела S_1 :

$$S_f = 2S + S_1 = \frac{\pi}{2} d^2 + \frac{\pi}{2} dh \approx 0.9h^2.$$

Максимальная высота подъема нагретого воздуха (термика) зависит от мощности источника [10]:

$$z_{tm} \approx 0.25P^{1/4}, \quad (7)$$

где z_{tm} — в километрах, P — в мегаваттах. Мощность $P = \varepsilon_T dm/dt$, где $\varepsilon_T = 4 \cdot 10^7$ Дж/кг — удельная теплота сгорания нефти, $dm/dt = \tilde{\rho}S_0v_0$, $\tilde{\rho} \approx 830$ кг/м³ — плотность нефти.

Величина P составляет около 8...80 ГВт при $dm/dt \approx 0.2...2$ т/с. Поток тепла от факела $\Pi_T = P/S \approx 0.01...10$ ГВт/м². Такие значительные потоки обеспечивают подъем термика до высоты 2...4 км. При оценках считалось, что максимальный

Таблица 5. Основные параметры горящей нефтяной скважины. Продолжительность горения 20 сут

Δp , МН/м ²	v_0 , м/с	h_m , м	h_1 , м	h_2 , м	h , м	d , м	z_{tm} , км	dm/dt , кг/с	m_1 , Мт	m_2 , кт	m_3 , кт	E , ПДж
0.02	6.9	2.5	1.9	1.5	3.4	0.75	2.3	166	0.3	34	17	13.2
0.05	11	6.2	4.7	3.4	8.1	1.9	2.6	264	0.5	52	26	22
0.1	15.5	12.3	9.3	5.5	14.8	3.7	2.8	372	0.7	74	37	30
0.2	21.9	24.6	18.5	9.6	28.1	7.4	3	526	1.1	106	53	42
0.5	34.7	61.5	46	20.1	66.2	18.5	3.4	823	1.6	164	82	66
1	49	123	92	35.7	128	36.9	3.7	1176	2.4	236	118	94
2	69	246	185	62.2	246.7	73.8	4	1656	3.3	332	166	132

Δp , МН/м ²	S , м ²	S_f , м ²	S_t , км ²	Π_T , ГВт/м ²	Π_t , кВт/м ²	Π_a , кВт/м ²	P , ГВт	P_r , МВт	P_{rt} , ГВт	P_a , МВт	f_r , Гц	f_t , Гц
0.02	0.44	10.4	5.3	15	1.2	2000	6.6	4	6.5	20	1.3	13
0.05	2.8	59	6.8	3.9	1.5	600	11	23	11	33	0.5	5
0.1	10	197	7.8	1.5	1.9	200	15	81	14.5	45	0.3	3
0.2	43	710	9	0.5	2.3	89	21	310	20	63	0.14	1.4
0.5	267	3900	11.2	0.12	2.6	26	33	1800	29	100	0.054	0.54
1	1070	15000	13.2	0.04	2.6	9.3	47	7100	35	140	0.027	0.27
2	4275	55000	16	0.015	2.6	3.6	66	28000	40	200	0.014	0.14

радиус термика $R_{tm} = z_{tm}/3$, а площадь поверхности $S_t \approx z_{tm}^2$. Указанные оценки справедливы, если можно пренебречь влиянием ветра. Его учет приводит к сносу термика в горизонтальном направлении, увеличению объема и площади поверхности термика, к снижению температуры газа в нем и к уменьшению z_{tm} .

Большая часть энергии горения факела переходит во внутреннюю энергию термика и энергию его теплового излучения. Температура газа у основания факела примерно равняется температуре горения нефти, которая близка к $T_p \approx 1650$ К, на верхней границе термика она близка к температуре невозмущенного газа (около 250 К). Средняя по высоте температура термика $T_t \approx 400...500$ К (потому что $z_{tm} \gg h$). Поток тепла от термика $\Pi_t \approx 1...3$ кВт/м². Площадь поверхности термика составляла около $5 \cdot 10^5 ... 1.6 \cdot 10^6$ м², при этом мощность P_{rt} его теплового излучения достигала значений 10...40 ГВт. Поток мощности теплового излучения факела равен $\Pi_f = \sigma T_p^4$. Здесь σ — постоянная Стефана — Больцмана. Вычисления дают $\Pi_f \approx 4.2 \cdot 10^5$ Вт/м². При площади поверхности факела $S_f \approx 10...6 \cdot 10^4$ м² мощность теплового излучения P находилась в пределах 4 МВт...25 ГВт, что обычно составляло лишь малую долю от мощности источника $P \approx 7...70$ ГВт. Только для сильнейшей нефтяной струи с $v_0 \approx 70$ м/с и $h_m \approx 250$ м мощности P и P_f становятся одного порядка.

Нефтяной факел является мощным источником АГВ. В энергию последних переходит в среднем 0.3 % тепловой энергии факела, т.е. мощность АГВ $P_a \approx 3 \cdot 10^{-3} P$. Поток акустической энергии $\Pi_a = P_a/S_f$.

При горении нефтяных скважин следует ожидать усиления излучения АГВ на частотах f_b , f_r , f_t . Оценки f_r и f_t по формулам (5) и (6), как и результаты расчета других параметров горящей нефтяной скважины, приведены в табл. 5. Считалось, что $w = 5$ м/с, $v = 10$ м/с. Видно, что $f_r \approx 1...10^{-2}$ Гц, $f_t \approx 10...0.1$ Гц для $d \approx 1...70$ м соответственно.

Оценим далее общие последствия горения 50 нефтяных скважин. Параметры средней скважины примем следующими: $\Delta p = 1$ атм, $v_0 = 15.5$ м/с, $h = 15$ м, $d = 3.7$ м, $z_{tm} = 2.8$ км, $dm/dt \approx 370$ кг/с. За двадцать суток ($2 \cdot 10^6$ с) сгорело около $3.7 \cdot 10^{10}$ кг нефти. При этом выделилось около $1.5 \cdot 10^{18}$ Дж тепла, средняя мощность теплового источника составила $7.4 \cdot 10^{11}$ Вт, в атмосферу выброшено $3.7 \cdot 10^9$ кг дыма и около $1.9 \cdot 10^9$ кг углерода. Мощность и энергия АГВ составили около 2.3 ГВт и 4.5 ПДж.

Горение нефтехранилищ. В ходе боевых действий в Ираке часть нефтехранилищ была разрушена и подожжена. Так, г. Багдад был окружен горящими нефтяными озерами. По замыслу иракцев интенсивное дымовыделение должно было затруднить

Таблица 6. Зависимость основных параметров пожаров на нефтехранилищах (горение нефтяных озер) от объема сгоревшей нефти

$V_1, 10^3 \text{ м}^3$	$m_1, \text{кт}$	$E_1, \text{ТДж}$	$E_a, \text{ТДж}$	$\Delta t, 10^5 \text{ с}$	$\Delta h, \text{м}$	$m_2, \text{кт}$	$m_3, \text{кт}$
1	0.85	34	0.1	0.1	0.1	0.085	0.0425
3	2.6	102	0.3	0.3	0.3	0.26	0.13
5	4.3	170	0.5	5	0.5	0.43	0.22
10	8.5	340	1	1	1	0.85	0.43
30	26	1020	3.1	3	3	2.6	1.3
50	43	1700	5.1	5	5	4.3	2.2
100	85	3400	10	10	10	8.5	4.3

противнику прицельное бомбометание и наведение высокоточного оружия. Сильные пожары также наблюдались на юге Ирака.

Типичное нефтехранилище содержит до 30...50 тыс. м^3 сырья, его масса и энергосодержание составляет $m_1 = \rho V_1$ и $E_1 = \varepsilon_T m_1$. Примем, что площадь нефтяного озера S , а его глубина $\Delta h = V/S$. При средней площади озера $S = 10^4 \text{ м}^2$ и скорости выгорания нефти $\tilde{v} = 10^{-5} \text{ м/с}$ поток тепла в атмосферу $\Pi_T = \varepsilon_T \rho \tilde{v}$ составил $3.4 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$. Мощность источника тепла $P_T = \Pi_T S$ равнялась 3.4 ГВт. Время выгорания нефти $\Delta t = \Delta h / \tilde{v} = E_1 / P_T$ изменялось в пределах $10^4 \dots 10^6 \text{ с}$, т. е. от 0.1 до 10 сут. Массы дыма и углерода $m_2 = 0.1 m_1$ и $m_3 = 0.5 m_2$ соответственно. Высота термика оценивалась по формуле (7) и составила около 1.9 км.

В мощность акустических волн перешло 0.3 % мощности P_T .

Так же, как при городских пожарах и горениях нефтекважин, в спектре излучения АГВ следовало ожидать усиления составляющих на частотах f_b , f_r , f_t . При тех же значениях w , v и $S \approx 1 \dots 10^4 \text{ м}^2$ величины $f_r \approx 1 \dots 10^{-2} \text{ Гц}$, $f_t \approx 10 \dots 0.1 \text{ Гц}$ соответственно.

Результаты расчета основных параметров пожаров, сопровождавших горение нефтяных озер, приведены в табл. 6.

Оценим далее общий эффект от горения n нефтяных озер. Точное число пожаров не известно. Примем для оценок, что $n = 30$ и $V_1 = 30 \text{ тыс. м}^3$. При этом $m_{1\Sigma} = m_1 n = 7.8 \cdot 10^5 \text{ т}$, $E_\Sigma = E_1 n = 3 \cdot 10^{16} \text{ Дж}$, $\Delta t = 3 \cdot 10^5 \text{ с}$, $P_\Sigma \approx 100 \text{ ГВт}$, $S_\Sigma = 3 \cdot 10^5 \text{ м}^2$, $m_{2\Sigma} = 7.8 \cdot 10^4 \text{ т}$, $m_{3\Sigma} = 3.9 \cdot 10^4 \text{ т}$, $P_{a\Sigma} = 0.3 \text{ ГВт}$.

Электрические процессы. Сильные пожары сопровождались не только выбросами дыма, сажи и

других химических веществ. Как уже отмечалось, они были источниками АГВ. Кроме того, пульсирующий огненный факел являлся источником шумового электромагнитного излучения. Спектр излучения — широк (от единиц герц до сотен мегагерц) и неравномерный. В частности, следовало ожидать усиления излучения в низкочастотной части радиодиапазона за счет преобразования энергии атмосферного электрического поля в энергию низкочастотного электромагнитного излучения [38].

Сильные пожары существенно изменяли электрические свойства приземной атмосферы, влияя тем самым на параметры глобальной электрической цепи. В частности, проводимость огненного факела и горячего воздуха над ним значительно выше, чем проводимость окружающего воздуха. Значительная высотная протяженность факела и термика могли обеспечить заметное увеличение тока проводимости в возмущенных областях атмосферы. Усиление атмосферной конвекции обуславливало также увеличение конвекционного тока.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Под экологическими эффектами понимаются заметные и тем более сильные отклонения параметров околоземной среды от их невозмущенных, естественных значений, имеющие, как правило, негативные для жизнедеятельности человека последствия.

Экологические последствия военных действий в Ираке связаны, прежде всего, с выбросами аэрозолей (пыли) при взрывах, дыма и чистого углерода при городских пожарах, а также горениях нефтяных скважин и нефтехранилищ. Рассмотрим эти и другие факторы подробнее (табл. 7).

Выбросы пыли. Многочисленные ракетно-бомбовые удары привели к образованию пыли массой

Таблица 7. Результирующие параметры воздействия на атмосферу во время военных действий

Источник	Масса прореаги-ровавше-го вещества, кг	Масса дыма, кг	Масса CO ₂ , Мг	Масса С, кг	Масса пыли, кг	Энерговы-деление, 10 ¹⁵ Дж	Средняя продол-жительность, 10 ⁶ с	Средняя мощ-ность, ГВт	Акусти-ческая энергия, 10 ¹² Дж	Акусти-ческая мощ-ность, МВт	Энергия вторичных процессов, 10 ¹⁸ Дж	Мощность вторичных процессов, 10 ¹² Вт	Коэффи-циент усиле-ния энер-гии
Взрывы	15	—	0.05	—	300 (75)	0.06	1	0.06	6	6	20	20	3·10 ⁵
Городские пожары	10	1	0.03	0.5	—	0.4	0.1	4	1	10	0.17	1.7	400
Горение нефтяных сважин	37000	3700	100	1900	—	1500	2	740	4500	2300	13000	6500	8700
Горение нефтехра-нилищ	780	78	3	39	—	30	0.3	100	100	300	40	130	1300
Полеты летатель-ных аппаратов	40	4	0.15	0.1	—	1.6	0.1	16	0.04	0.4	Незна-читель-на	Незна-читель-на	—

около $3 \cdot 10^8$ кг. При этом масса аэрозолей m_a , заброшенных на достаточно большие высоты (не менее 1...2 км), приблизилась к 10^8 кг. Солнечное излучение, рассеиваясь на аэрозолях, ослабляется после прохождения запыленного слоя атмосферы. В результате этого поверхность Земли экранируется и недополучает энергию солнечного излучения. Рассеяние приводит к уменьшению потока солнечной радиации на поверхности Земли на величину [24]

$$\Delta\Pi_s = \Pi_{s0}(1 - e^{-\gamma}), \quad (8)$$

$$\gamma = 1.7(\gamma_{ab} + 0.15\gamma_s), \quad (9)$$

где Π_{s0} — поток солнечного излучения в отсутствие аэрозолей, γ_{ab} и γ_s — оптические толщины поглощения и рассеяния.

При прохождении слоя пыли поглощение малосущественно и ослабление обусловлено рассеянием света. При этом $\gamma \approx 0.25\gamma_s$, где $\gamma_s = \alpha_s \rho_a s$, α_s — коэффициент экстинкции (для пыли $\alpha_s = 3 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$ [24]), $\rho_a = m_a/V_a$, V_a — объем занимаемый аэрозолями общей массой m_a , s — длина участка траектории луча света в слое с аэрозолями толщиной Δz_a .

Как следует из соотношения (8), при $\gamma \gg 1$ $\Delta\Pi_s \approx \Pi_{s0}$. В этом случае атмосфера настолько запылена, что солнечное излучение почти полностью экранируется. Такой случай в ходе военных действий, если и имел место, то в течение достаточно небольших интервалов времени. Обычно реализовывался случай $\gamma \ll 1$. При этом $\Delta\Pi_s =$

$= \Pi_{s0}\gamma$, величина недополучаемой земной поверхностью мощности равна

$$\Delta P_s = \Delta\Pi_s S = \Pi_{s0}S\gamma, \quad (10)$$

где S — площадь участка подстилающей поверхности. При $\gamma_{ab} \approx 0$ значение $\Delta P_s \approx 0.25\Pi_{s0}S\alpha_s\rho_a s$. Поскольку $\rho_a = m_a/S\Delta z_a$, величина $\Delta P_s = 0.25\Pi_{s0}\alpha_s m_a \frac{s}{\Delta z_a}$. В течение дня поток мощности солнечного излучения изменяется по закону $\Pi_{s0}(\chi) = \Pi_{s0}(0)\cos\chi$, где χ — зенитный угол. Это соотношение справедливо при $\chi < 80^\circ$. Величина $s = \Delta z_a/\cos\chi$ (при $\chi < 80^\circ$). Тогда

$$\Delta P_s = 0.25\Pi_{s0}(0)\alpha_s m_a,$$

т. е. в течение почти всего светлого времени суток не зависит от χ . В случае не запыленной атмосферы земная поверхность поглощает в среднем около 45 % потока солнечного излучения [24], т. е. $\Pi_{s0}(0) = 0.45\Pi_0$, где $\Pi_0 \approx 1.4 \text{ кВт}/\text{м}^2$ — солнечная постоянная. Полагая $\Pi_{s0}(0) = 630 \text{ Вт}/\text{м}^2$, $\alpha_s = 3 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$, $m_a = 10^8 \text{ кг}$, получим $\Delta P_s \approx 4 \cdot 10^{13} \text{ Вт}$. В среднем за сутки эта величина составляет около $2 \cdot 10^{13} \text{ Вт}$. Эквивалентная площадь земной поверхности, которая недополучает мощность солнечного излучения ΔP_s , равна $S_{ef} = 0.25\alpha_s m_a \approx 6 \cdot 10^{10} \text{ м}^2$. Заметим, что площадь Ирака составляет $4.4 \cdot 10^{11} \text{ м}^2$. При умеренном ветре (скорость ветра $w = 10 \text{ м}/\text{с}$) выброшенная пыль перемещалась по Ираку примерно в течение суток.

При этом земная поверхность недополучила около $2 \cdot 10^{18}$ Дж солнечной энергии. Примерно такая же энергия выделилась в атмосфере. Для сравнения укажем, что тепловая энергия тропосферы и стратосферы над Ираком близка к 10^{21} и 10^{20} Дж соответственно. Мощность динамических процессов (ветров) в тропосфере и стратосфере порядка $10^{14} \dots 10^{15}$ Вт [35]. В течение суток ей соответствует энергия $10^{19} \dots 10^{20}$ Дж. Оцененное выше значение $\Delta P_s \approx 4 \cdot 10^{13}$ Вт сопоставимо с мощностью динамических процессов в атмосфере. Следовательно, запыление атмосферы при взрывах должно было заметно повлиять на циркуляцию ветров в ней.

Выбросы дыма и углерода. Пожары сопровождаются выбросами дыма и сажи (углерода). Аэрозоли дыма и сажи приводят соответственно к рассеянию и поглощению солнечного излучения. При этом коэффициенты экстинкции для видимого солнечного излучения $\alpha_s \approx 3.5 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$, $\alpha_{ab} \approx 5 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$ [24]. Из соотношений (9) и (10) следует, что $\Delta P_s = 1.7 \Pi_{s0}(0)(\alpha_{ab} m_{ab} + 0.15 \alpha_s m_a)$. При массе дыма $m_a = 4 \cdot 10^9$ кг, массе углерода $m_{ab} \approx 2 \cdot 10^9$ кг и $\Pi_{s0}(0) = 630 \text{ Вт}/\text{м}^2$ имеем $\Delta P_s \approx 1.3 \cdot 10^{16}$ Вт. При этом подстилающая поверхность недополучит примерно $\Delta P_s = 1.3 \cdot 10^{16}$ Вт солнечного излучения. В среднем за сутки это значение в два раза меньше и составляет $\Delta P_s = 6.5 \cdot 10^{15}$ Вт. Реально это значение на порядок меньше, так как дым имеет свойство оседать на подстилающую поверхность и только аэрозоли, заброшенные в стратосферу, выпадают в течение многих суток и недель. Примем, что с учетом оседания дыма $\Delta P_s \approx 5 \cdot 10^{14}$ Вт. При $\Delta t \approx 20$ сут $\Delta E_s \approx 10^{21}$ Дж. Примерно такую добавочную энергию приобрела атмосфера за счет выброса дыма и сажи, в том числе часть атмосферы над Ираком дополнительно получила около 10^{20} Дж солнечной энергии (при скорости ветра около 10 м/с). При этом имели место значительные изменения термического и динамического режимов атмосферы и характера взаимодействия атмосферы с земной поверхностью.

Добавим, что наибольший вклад в экранировку солнечного излучения дымом дали пожары, обусловленные горением нефтяных скважин. Горение хранилищ нефтепродуктов дало эффект, меньший примерно в 50 раз. Выбросы дыма при полете летательных аппаратов и городских пожарах привели к еще меньшему (на 1.5...2 порядка) эффекту, чем выбросы при горении нефтехранилищ (см. табл. 7).

Таблица 8. Массы аэрозолей и химических веществ, инжектируемых в атмосферу в ходе военных действий

Вещество	Инжектированная масса, Mt	Фоновое значение во всей атмосфере, Mt	Фоновое значение в атмосфере над Ираком, кт
Пыль	0.075	50...250	40...200
Дым	4	5.5	4
Двуокись углерода	100	$3 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$
Оксис углерода	4	500	400
Углерод	2	0.5	0.4
Углеводороды:			
CH ₄	0.2	5000	4000
C ₂ H ₆	0.2	5	4
другие	0.2	0.2	0.2
Окислы серы	0.09	0.9	0.7
Окислы азота	0.07	0.7	0.5
Кислоты:			
HCl	0.3	3	2
H ₂ SO ₄	0.15	1.5	1
HNO ₃	0.1	1	0.8

Выбросы химических веществ. Горение нефти и органических веществ при городских пожарах сопровождается инжекцией в атмосферу не только дыма, двуокиси и окиси углерода, сажи (углерода), но и таких химических веществ как углеводороды (CH₄, C₂H₆ и т. д.), оксиды серы и азота, а также кислоты (HCl, H₂SO₄, HNO₃) и др. Их масса в основном зависит от вида и массы прореагировавшего горючего материала. В ходе военных действий таким материалом преимущественно была нефть. Это позволило оценить массы выброшенных химических веществ. Результаты их оценок приведены в табл. 8. Видно, что военные действия привели лишь к незначительному (около 1 %) дополнительному запылению атмосферы. В то же время масса выброшенного дыма за 10...20 дней приблизилась к фоновому значению массы дыма во всей атмосфере (около $5 \cdot 10^9$ кг). Это повлекло за собой значительные выбросы двуокиси и окиси углерода. Так средняя скорость дополнительного поступления CO₂ составила 50 т/с (в мирных условиях эта величина составляет около 500 т/с). Окиси углерода в атмосферу поступило около $4 \cdot 10^9$ кг, т. е. около 1 % всей массы этого газа в атмосфере. Еще более впечатляющие поступления сажи, которые приблизились к $2 \cdot 10^9$ кг (фоновое значение $5 \cdot 10^8$ кг).

Дополнительные выбросы углеродов были существенными лишь для достаточно тяжелых углеводородов (C₃H₈ и т. п.). Они составили величины, примерно равные фоновым во всей атмосфере.

Массы дополнительно выброшенных окислов серы и азота, а также кислот составили около 10 % масс этих веществ, поступающих в земную атмосферу в результате хозяйственной деятельности человека.

Инжекция акустической энергии. В естественных условиях поток акустической мощности $\Pi_{a0} \approx 0.3...1 \text{ мВт}/\text{м}^2$ [26]. Для площади Ирака, равной $4.4 \cdot 10^{11} \text{ м}^2$, акустическая мощность фона P_{a0} составляет около $0.1...0.4 \text{ ГВт}$. Примерно 0.1 ГВт приходится на долю низкочастотных АГВ, т. е. ВГВ, которые, распространяясь вверх и диссирируя на высотах 200...300 км, играют важную роль во взаимодействии нижней и верхней атмосфер Земли.

Рассмотрим теперь энергетику акустических процессов, вызванных военными действиями в Ираке. Как видно из табл. 7, наименьший вклад в энергетику этих процессов дают полеты летательных аппаратов (мощность P_a до 1 МВт). Взрывы обеспечивали инжекцию акустической энергии с P_a менее 10 МВт. Почти такое же значение P_a связано с городскими пожарами. И только горение нефтехранилищ и нефтескважин способствовало инжекции акустической энергии со значением P_a , приближающимся к 3 ГВт. Важно, что $P_a \approx 10P_{a0}$. Это означает, что военные действия в Ираке существенно повлияли на режим взаимодействий нижней и верхней атмосфер над Ираком.

Другие экологические эффекты. К определенным экологическим последствиям привела инжекция тепловой энергии в результате сгорания больших масс горючих веществ, сейсмической энергии при взрывах мощных боевых частей и электромагнитной энергии при взрыве СВЧ-бомбы. Эти последствия относятся к сравнительно слабым. Более существенным является возмущение параметров глобальной электрической цепи в результате выброса наэлектризованной пыли при взрывах, значительных масс дыма при пожарах и радиоактивных веществ при взрывах боевых частей, снабженных насадками из слабо обогащенного урана. Мощные пожары, как и выброс радиоактивного вещества, способствовали увеличению проводимости приземного слоя атмосферы на значительных площадях, который, как известно, имеет наибольшее сопротивление в глобальной электрической цепи. Изменение электрических параметров этой цепи могло повлечь за собой проявление ряда вторичных процессов как в атмосфере, так и в ионосфере и магнитосфере [5, 16, 25, 28, 33, 38, 39].

ОБСУЖДЕНИЕ

В работе выполнена оценка ряда физических и экологических эффектов, которые были вызваны военными действиями в Ираке. Большинство входных параметров не были известны точно. Из-за этого возникла некоторая неопределенность в величине изучаемых эффектов. Для уменьшения неопределенности почти всегда расчеты производились для различных значений входных параметров (числа самолетовылетов, числа сброшенных авиабомб, их мощности и энерговыделения, площадей и интенсивностей пожаров и т. п.). Несмотря на приближенный характер расчетов, полученные оценки физических и экологических эффектов позволяет сделать ряд важных выводов. К ним, в первую очередь, относится триггерный характер вторичных процессов, энергия которых на 3...5 порядков превышает энерговыделение при взрывах и пожарах (см. табл. 7). Наибольшее значение коэффициента усиления энергии (около $3 \cdot 10^5$) имеет место при выбросах мелкой пыли взрывами, наименьшее значение — при городских пожарах (около 400).

Триггерный характер воздействия. Для количественного описания триггерного эффекта удобно ввести коэффициент триггерности $K_{tr} = E_2/E_1$, где E_2 и E_1 — энергии вторичных и первичных процессов. Считая, что вторичные процессы вызваны экранированием солнечного излучения с потоком мощности Π_{s0} на площади земной поверхности S , при $\gamma \ll 1$ получим

$$\Delta P_s = \Pi_{s0} S \gamma,$$

где согласно данным [24] $\gamma = 1.7(\gamma_{ab} + 0.15\gamma_s)$, $\gamma_{ab} = \alpha_{ab}\rho_{ab}s = \alpha_{ab}m_{ab}/Scos\chi$, $\gamma_s = \alpha_s\rho_s s = \alpha_s m_s/Scos\chi$, m_{ab} и m_s — массы поглощающей пыли и рассеивающих аэрозолей, ρ_{ab} и ρ_s — их объемные плотности. В среднем за сутки ΔP_s уменьшится примерно вдвое. Тогда энергия вторичных процессов $E_2 = 0.5\Delta P_s \Delta t_s$, или

$$E_2 = 0.85\Pi_{s0}S(\gamma_{ab} + 0.15\gamma_s)\Delta t_s = \\ = 0.85\Pi_{s0}(0)(\alpha_{ab}m_{ab} + 0.15\alpha_s m_s)\Delta t_s.$$

При взрывах $m_{ab} \approx 0$, $m_s = k_a m_d$, где $k_a = k_1 k_2 k_3$, $k_1 = m_1/m_d = 40...800$ — коэффициент разрушения, $k_2 = m_2/m_1$ — коэффициент пылеобразования, $k_3 = m_3/m_2$ — доля пыли, забрасываемой на достаточно большие высоты. Полагая $k_2 = 0.1$, $k_3 = 1/4$, получим $k_a = 1...20$. Поскольку $m_s = k_a m_d$, $E_1 = E_d = \varepsilon_d m_d$,

$$K_{tr} \approx 0.13 \frac{\Pi_{so}(0)\alpha_s k_a}{\varepsilon_d} \Delta t_s. \quad (11)$$

При $\Pi_{so}(0) = 630 \text{ Вт}/\text{м}^2$, $\alpha_s = 3 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$, $k_a = 1 \dots 20$, $\Delta t_s = 10^6 \text{ с}$ имеем $K_{tr} \approx 6 \cdot 10^4 \dots 10^6$.

При пожарах $\alpha_{ab} \approx 2.86\alpha_s s_c$, где s_c — массовая доля углерода [24]. При $s_c \approx 0.5$ величина $\alpha_{ab} \approx 5 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$. Поскольку $m_{ab} = k_{ab}m_1$, $m_a = k_a m_1$, $E_1 = \varepsilon_T m_1$,

$$K_{tr} = 0.85 \frac{\Pi_{so}(0)(\alpha_{ab}k_{ab} + 0.15\alpha_s k_a)}{\varepsilon_T} \Delta t_s. \quad (12)$$

Здесь $k_{ab} = (m_a/m_1)(m_{ab}/m_a)$, $k_a = m_a/m_1$, m_a/m_1 — коэффициент образования аэрозолей, m_{ab}/m_a — доля углерода в массе аэрозолей. При $k_{ab} = 0.05$, $k_a = 0.1$, $\varepsilon_T = 4 \cdot 10^7 \text{ Дж}/\text{кг}$, $\Delta t_s = 10^6 \text{ с}$ получаем $K_{tr} \approx 4 \cdot 10^3$.

Из формул (11) и (12) видно, что K_{tr} пропорционален Δt_s и не зависит от S (при $\gamma \ll 1$).

При взрывах и пожарах (в основном при горении нефтекважин) суммарное энерговыделение достигло примерно $2 \cdot 10^{18} \text{ Дж}$, а средняя мощность — почти 10^{12} Вт . Для сравнения укажем, что человечество в год потребляет около $4 \cdot 10^{20} \text{ Дж}$ при мощности 10^{13} Вт . При взрывах выброшены аэрозоли массой около $8 \cdot 10^7 \text{ кг}$, что составило почти 0.1 % от массы аэрозолей во всей атмосфере. Их масса над Ираком примерно удвоилась по сравнению с фоновым значением.

Выбросы дыма составили около 4 Мт, фоновое значение массы дыма над Ираком в среднем близко к 4 кт. На несколько порядков превысили фоновое значение также выбросы углерода, углеводородов, оксидов серы и азота и кислот (см. табл. 8). Естественно, что эти выбросы усугубили экологическую обстановку как в Ираке, так и в прилегающих к нему государствах. Добавим, что в ходе военных действий ветер над Ираком был направлен преимущественно с юга на север.

Энергия и мощность вторичных процессов приблизились к 10^{22} Дж и $7 \cdot 10^{15} \text{ Вт}$. В то же время мощность динамических процессов (ветров) в атмосфере над Ираком при средней скорости ветра составляет около 10^{13} Вт , а их энергия за время ведения военных действий (20 сут) — около $2 \cdot 10^{19} \text{ Дж}$. Экранирование слоем пыли, дыма и сажи солнечного излучения привело к тому, что земная поверхность недополучила солнечной энергии около 10^{22} Дж при средней мощности около $7 \cdot 10^{15} \text{ Вт}$. Все это означает, что военные действия

привели к существенному нарушению теплового и динамического режимов в системе подстилающая поверхность — атмосфера над Ираком. Наибольший вклад в этот эффект дало горение нефтяных скважин; вклад взрывов и пожаров на нефте хранилищах был в 100...1000 раз меньше. Еще к меньшему (в 100 раз) эффекту привели городские пожары.

Механизмы забрасывания аэрозолей. В изучении энергетики вторичных процессов ключевым есть решение вопроса, каким образом аэрозоли (пыль и дым) забрасываются на высоты не менее 1...2 км, где время их жизни составляет 1...10 сут. Есть ряд механизмов, обеспечивающих подъем частиц на достаточные большие высоты. Рассмотрим их подробнее.

1) Интенсивные взрывы и пожары сопровождались подъемом нагретого воздуха (термика) до высот $z_{tm} \approx 0.2 \dots 4 \text{ км}$ (см. табл. 1, 4 и 5).

2) Дополнительный нагрев атмосферного слоя с аэрозолями солнечным излучением, приводит к его всплынию. Вертикальные потоки воздуха способствовали подъему новых порций пыли, образованной взрывами, или дыма при пожарах. За 10 сут верхняя граница z_{max} слоя с аэрозолями могла подняться от 2 до 10 км. Покажем это. Воспользуемся соотношением из работы [10]

$$\Delta z_{max}(t) = \sqrt{\frac{2\Delta\bar{\Pi}_s}{\Delta\gamma_a \bar{\rho}_0 C_p}} \Delta t,$$

где $\Delta\gamma_a$ — отклонение вертикального градиента температуры атмосферы от адиабатического, $\bar{\rho}_0$ — средняя по высоте плотность воздуха, C_p — его удельная теплоемкость при постоянном давлении, $\Delta\bar{\Pi}_s$ — средний за сутки радиационный поток излучения на верхней границе слоя с аэрозолями. Полагая $\Delta\bar{\Pi}_s = 120 \text{ Вт}/\text{м}^2$, $\Delta\gamma_a = 3.5 \text{ К}/\text{км}$, $\bar{\rho}_0 = 1 \text{ кг}/\text{м}^3$, $C_p = 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ и $\Delta t = 10^6 \text{ с}$, получим $\Delta z_{max} \approx 8 \text{ км}$. За световой день ($\Delta\Pi_s = 240 \text{ Вт}/\text{м}^2$, $\Delta t = 5 \cdot 10^4 \text{ с}$) Δz_m увеличивается на 2.6 км.

3) Концентрация водяных паров сопровождается выделением латентного тепла и всплыvанием нагретого воздуха. Оказывается, что за счет этого механизма высота термика увеличивается в 2...3 раза и достигает 0.4...9 км.

4) Аэрозоли во взвешенном состоянии могут поддерживаться за счет энергии атмосферной турбулентности. Можно показать, что среднее перемещение аэрозолей по высоте за время Δt оценивается из следующего соотношения:

$$\Delta z \approx 3^{-1/2} \varepsilon_t^{1/6} L_0^{2/3} \Delta t^{1/2},$$

где ε_t — удельная мощность турбулентности, L_0 — внешний масштаб турбулентности. Полагая $\varepsilon_t = 0.1 \text{ м}^2/\text{с}^3$, $L_0 = 10 \text{ м}$, $\Delta t = 10 \text{ сут}$, получим $\Delta z \approx 1.7 \text{ км}$. В пределах термика величина ε_t увеличивается на порядок, это приведет к увеличению высоты аэрозолей до 2.5 км. Добавим, что средняя скорость подъема частиц около $2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$. Она должна превышать скорость оседания частиц v_d (см. табл. 2). Это условие выполняется для аэрозолей с радиусом $r \leq 10^{-6} \text{ м}$.

Таким образом, продолжительные пожары и повторяющиеся ракетно-бомбовые удары привели к накоплению аэрозолей в атмосфере, некоторые затем вызвали энергичные вторичные процессы.

Воздействие АГВ. Движущиеся летательные аппараты, взрывы и особенно пожары были мощными источниками акустических и гравитационных волн. Последние в основном генерировались при колебаниях объемов нагретого воздуха (термика), их частота, по-видимому, была близка к собственной частоте атмосферы $f_b \approx 0.002 \text{ Гц}$ (период около 500 с). Спектр акустических колебаний занимал весь акустический диапазон от инфразвука до ультразвука. В зависимости от размеров генерирующего объема воздуха (пламени) или тела (самолета, крылатой ракеты) и скорости движения газа, очевидно, были участки спектра, в которых интенсивности излучения увеличивались. По оценкам, приведенным выше, такими участками могли быть $0.01\ldots 1$, $0.1\ldots 10$ и $400\ldots 700 \text{ Гц}$.

Суммарная энергия АГВ, сгенерированных в ходе операции «Страх и трепет», приблизилась к 5 ПДж , т.е. $5 \cdot 10^{15} \text{ Дж}$, при средней мощности около 2 ГВт . Для сравнения укажем, что над территорией Ирака фоновое значение мощности АГВ примерно равно $0.1\ldots 0.3 \text{ ГВт}$. Видно, что военные действия привели к увеличению мощности АГВ на порядок, что в свою очередь вызвало значительную перестройку режима взаимодействия между нижней и верхней атмосферами.

Передача возмущений из нижней атмосферы в ионосферу и магнитосферу могла осуществиться и по другим, пока мало изученным, каналам. К ним можно отнести конвекцию и атмосферную турбулентность, которая имеет место и на достаточно больших высотах [25], а также возмущение параметров глобальной электрической цепи [5, 16, 28, 33, 38, 39]. Последнее возникало в результате выброса больших масс наэлектризованной пыли и продуктов взрыва, применения в боеголовках слан-

бообогащенного урана и возникновения крупномасштабных пожаров. Упомянутые механизмы переноса возмущений требуют дальнейшего изучения. Сейчас можно только утверждать, что конвекция и турбулентность относятся к инерционным механизмам. Характерное время переноса — порядка 10 сут, что и наблюдалось в экспериментах [1, 27]. Возмущение параметров глобальной электрической цепи следует отнести к малоинерционным. Характерное время, по-видимому, может составлять $10^3\ldots 10^4 \text{ с}$.

Сейсмическое воздействие. Взрывы способствовали генерации сейсмических волн, суммарная энергия которых оценена выше в $6 \cdot 10^{11} \text{ Дж}$. В средствах массовой информации широко обсуждались возможные сейсмические последствия ракетно-бомбовых ударов в Ираке. Специалистами (как и неспециалистами) предсказывались инициирование сильных землетрясений в Ираке и в соседних с ним государствах. Указанная выше величина энергии в силу своей незначительности вряд ли способна привести к срабатыванию триггерных механизмов высвобождения энергии в тектоносфере. Кроме того, передача энергии носила импульсный характер (длительность цугов сейсмических волн $1\ldots 10 \text{ с}$). Добавим, что энергии среднего и сильнейшего землетрясений составляют $10^{15}\ldots 10^{16}$ и $10^{18}\ldots 10^{19} \text{ Дж}$ соответственно [35].

Воздействие электромагнитного излучения Е-бомбы. Перейдем к обсуждению последствий подрыва электромагнитной бомбы. Как уже отмечалось, это было ее первое боевое применение. Мощность излучения была весьма высокой (10 ГВт), спектр излучения относится к сверхширокополосным (несколько ГГц). Излучение СВЧ-бомбы привело к выходу из строя (разрушению входных цепей) радиоэлектронного оборудования на удалениях от 0.2 до 20 км. Важно, что блокирующее действие бомбы должно проявляться при существенно меньших, чем $E_{rmin} = 10^{-8}\ldots 10^{-6} \text{ Дж}$, уровнях энергии электромагнитного излучения, а значит, на расстояниях 10...100 км и более. При этом, например, наступают нарушения различий степени сложности в производимых радиоэлектронной аппаратурой (компьютером, в частности) операциях [www.laboratory.ru/article/rad/arozor.htm].

Значительное влияние мощных электромагнитных полей на медицинские электронные приборы (стимуляторы сердца и т. п.) ожидается уже при $E_0 \approx 1 \text{ В/м}$ [37]. Радиоприемные устройства радаров рассчитаны на прием сигналов с напряженностью $E_{0min} = 10^{-7}\ldots 10^{-5} \text{ В/м}$.

Для сравнения приведем ориентировочные параметры наземной станции помех радарам и бомбоприцелам: мощность — 1 кВт, коэффициент усиления антенны — 400, диапазон длин волн $\lambda = 2\ldots2.5$ см, ширина полосы частот излучаемого сигнала с шумовой модуляцией $\Delta f \approx 10\ldots100$ МГц. Результаты расчета потока мощности Π_{p1} в окрестности подавляемой цели приведены в табл. 3. Из нее видно, что СВЧ-бомба на тех же расстояниях создает поток мощности Π_p , на 3-4 порядка больший, чем поток Π_{p1} . Поэтому по эффективности воздействия излучение электромагнитной бомбы приближается к электромагнитному излучению ядерной бомбы [36]. Излучение разряда молнии, имеющее мощность 0.1...1 МВт, существенно влияет лишь в диапазоне частот 1 кГц...10 МГц. При этом в окрестности источника $N_r \approx 0.01\ldots1$ Вт/Гц.

Таким образом, результаты выполненных исследований сводятся к следующему. Воздействие на атмосферу в ходе современных региональных неядерных войн может быть значительным. Наиболее существенные экологические последствия связаны в выбросами мелкой пыли, дыма и сажи, которые экранируют солнечное излучение. Энергия вторичных процессов на 3...5 порядков превосходит энергию первичного источника. Как показали эксперименты [1, 27], возникшие возмущения распространяются на большие (~ 1000 км) расстояния и охватывают, по-видимому, не только нижнюю атмосферу, но и ионосферу с магнитосферой.

выводы

1. Военные действия в Ираке характеризовались быстротечностью, нанесением интенсивных ракетно-бомбовых ударов на ограниченных территориях в ограниченные интервалы времени. Суммарная масса использованных взрывчатых веществ за первые две недели войны достигла 11 кт, а за время боевых действий (около трех недель) она приблизилась к 15 кт.

2. Полеты самолетов (около 1800 вылетов) и крылатых ракет (1100 штук) привели к инжекции 100...200 и 1 кт продуктов горания топлива соответственно.

Суммарная энергия акустических колебаний, вызванных полетами самолетов и крылатых ракет, составила 20...75 и 0.4 ГДж соответственно. Частотный спектр акустического излучения был достаточно широк. Движение летательных аппаратов и

струй реактивных двигателей обусловили значительное усиление излучения в частотных диапазонах 3...30 и 400...700 Гц.

3. При взрывах всех боеприпасов разрушено примерно 3 Мт вещества. Масса аэрозолей при этом составила около 0.3 Мт, четвертая часть которых (75 кт), по-видимому, заброшена взрывами и конвекционными процессами на достаточно большие высоты (1...2 км), где время жизни аэрозолей составляет 1...10 сут.

Взрывы сопровождались электризацией пыли и продуктов взрыва, генерацией возмущений в электрическом поле атмосферы. Величина суммарного электрического заряда достигала 100 Кл. Возмущения электрического поля в окрестности взрыва ($R \approx 10$ м) были порядка сотен киловольт на метр, продолжительность отдельного возмущения изменялась в пределах нескольких сотен секунд.

Взрывам сопутствовала генерация акустических колебаний в диапазоне частот 1...10 Гц. Их суммарная энергия составила около 3 ТДж, а средняя мощность — 6 МВт.

Энергия сейсмических волн, сгенерированных взрывами, не превышала 0.6 ТДж.

4. Поражение радиоэлектронного оборудования электромагнитным излучением СВЧ-бомбы было возможным на расстояниях от долей до нескольких десятков километров. Повреждение и «зависание» компьютеров было вероятным на несколько больших (1...100 км) удалениях от места подрыва бомбы. Вывод из строя медицинского оборудования типа сердечных стимуляторов был возможен в пределах прямой видимости на удалениях в несколько сотен километров.

5. Мощность и энерговыделение отдельного городского пожара достигали 10 МВт и 1 ТДж. Суммарное энерговыделение было около 400 ТДж при средней мощности близкой к 4 ГВт. При этом в атмосферу было выброшено около 1 кт дыма и 0.5 кт сажи.

Энергия и мощность вторичных процессов, обусловленных экранированием солнечного излучения, составили около 170 ПДж и 1.7 ТВт.

Величина акустической энергии, сгенерированной городскими пожарами, достигала 1 ТДж при средней мощности 10 МВт.

6. Горение нефтяных скважин — самый интенсивный источник возмущения параметров околоземной среды и процессов в ней. Мощность, выделяемая при горении скважины, составляла десятки ГВт, энерговыделение — десятки ПДж, а высота термика — 3 км. Суммарное количество сгоревшей

нефти приблизилось к 40 Мт, энерговыделение — к 1000 ПДж при средней мощности около 1 ТВт. В результате горения нефтяных скважин (около 50 штук) в атмосферу было выброшено почти 4 Мт дыма и 2 Мт сажи. Это привело к эффекту экранирования солнечного излучения, из-за которого земная поверхность недополучила около 10^{22} Дж энергии солнечного излучения. Мощность этого вторичного процесса составила около 7 ПВт. Горение нефтяных скважин сопровождалось генерацией АГВ с энергией около 4.5 ПДж и средней мощностью около 2 ГВт.

7. При пожарах на нефтехранилищах сгорело почти 1 Мт нефти, в атмосферу выброшено около 80 кт дыма и 40 кт сажи. Суммарное энерговыделение составило 30 ПДж при средней мощности 100 ГВт. Энергия и мощность вторичных процессов, связанных с экранированием солнечного излучения, составили $4 \cdot 10^{19}$ Дж и 0.1 ПВт.

Горение нефтехранилищ сопровождалось генерацией АГВ с энергией около 100 ТДж и мощностью 0.3 ГВт.

8. При пожарах в частотном спектре АГВ должно было иметь место усиление составляющих на частотах 0.002, 0.1 и 1 Гц при среднем диаметре пламени около 10 м.

9. Взрывы, городские пожары, горение нефтяных скважин и нефтехранилищ привели к эффекту экранирования солнечного излучения. Энергия сопутствующих вторичных процессов превышала энергию первичного процесса (взрыва, горения) примерно на 3...5 порядков.

10. Кроме нарушения теплового и динамического режимов в системе подстилающая поверхность — атмосфера, к негативным экологическим последствиям привели выбросы углеводородов (10...100 % от фонового значения во всей атмосфере) и кислот HCl, H₂SO₄ и HNO₃ (~ 10 % от фонового значения во всей атмосфере).

11. Интенсивные пожары, выбросы наэлектризованной пыли и аэрозолей, инжекция радиоактивного вещества в результате использования слабо обогащенного урана должны были привести к существенному возмущению электрических параметров атмосферы на Ираком и глобальной электрической цепи в целом.

12. Значительная энергетика АГВ обусловила нарушение режима взаимодействия нижней и верхней атмосфер. По-видимому, имели место и другие каналы воздействия процессов в приземной атмосфере на ионосферу и магнитосферу.

13. Энергия сейсмических волн, сгенерированных взрывами, была недостаточной для активизации

естественных сейсмических процессов в литосфере и инициирования землетрясений.

Автор благодарен К. П. Гармашу за полезное обсуждение результатов работы.

1. Адушкин В. В., Горелый К. И. Доплеровское зондирование ионосферы над Югославией во время военных действий в Косово // ДАН.—2000.—373, № 1.—С. 87—89.
2. Адушкин В. В., Соловьев С. П. Возмущения электрического поля атмосферы в ближней зоне подземного взрыва // Изв. АН СССР. Физика Земли.—1989.—№ 3.—С. 51—59.
3. Адушкин В. В., Соловьев С. П., Сурков В. В. Электрическое поле, возникающее при взрыве на выброс // Физика горения и взрыва. 1990.—26, № 4.—С. 117—121.
4. Альперович Л. С., Пономарев Е. А., Федорович Г. В. Моделируемые взрывом геофизические явления (Обзор) // Изв. АН СССР. Физика Земли.—1985.—№ 11.—С. 9—20.
5. Анисимов С. В., Мареев Е. А. Спектры пульсаций электрического поля приземной атмосферы // ДАН.—2001.—381, № 1.—С. 107—112.
6. Антипин В. В., Годовицын В. А., Громов Д. В. и др. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы // Зарубежная радиоэлектроника.—1995.—№ 1.—С. 37—53.
7. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва. — М.: Наука, 1975.—704 с.
8. Боронин А. П., Капинос В. Н., Кренев С. А., Минеев В. Н. О физическом механизме генерации электромагнитного поля при взрыве зарядов конденсированного ВВ. Обзор литературы // Физика горения и взрыва.—1990.—26, № 5.—С. 110—116.
9. Боронин А. П., Капинос В. Н., Кренев С. А., Минеев В. Н. О физическом механизме генерации электромагнитного поля при взрыве зарядов конденсированного ВВ. Результаты экспериментальных исследований // Физика горения и взрыва.—1990.—26, № 5.—С. 117—123.
10. Будыко М. И., Голицын Г. С., Израэль Ю. А. Глобальные климатические катастрофы. — М.: Гидрометеоиздат, 1986.—160 с.
11. Гостищев Ю. А., Иванов Е. А., Анисимов С. В. и др. О механизме генерации инфразвуковых волн в атмосфере большими пожарами // ДАН.—1985.—283, № 3.—С. 573—576.
12. Гостищев Ю. А., Иванов Е. А., Копылов Н. П., Шацких Ю. В. Волновые возмущения атмосферы при больших пожарах // Физика горения и взрыва.—1983.—19, № 4.—С. 62—64.
13. Гостищев Ю. А., Иванов Е. А., Шацких Ю. В. Инфразвуковые волны в атмосфере при больших пожарах // ДАН.—1983.—271, № 2.—С. 327—330.
14. Гостищев Ю. А., Копылов Н. П., Суханов Л. А. и др. Горение нефти на водной поверхности (крупномасштабный эксперимент) // Физика горения и взрыва.—1983.—19, № 4.—С. 36—39.
15. Губкин К. Е. Распространения взрывных волн // Механика в СССР за 50 лет. Т. 2. Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1970.—С. 269—311.
16. Дмитриев Э. М., Анисимов С. В. Отклик атмосферного электрического поля на изменение проводимости в приземной атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия.—1994.—34, № 3.—С. 97—103.

17. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику. — М.: Наука, 1966.—520 с.
18. Климатические и биологические последствия ядерной войны / Отв. ред. Е. П. Велихов. — М.: Наука, 1987.—288 с.
19. Кук М. А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. — М.: Недра, 1980.—453 с.
20. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. — М.: Наука, 1986.—736 с.
21. Мырова Т. О., Чепиженко А. З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующему и электромагнитному излучениям. — М.: Радио и связь. 1988.—296 с.
22. Онуфриев А. Т. Теория движения вихревого кольца под действием силы тяжести // Подъем облака атомного взрыва. ПМТФ.—1967.—№ 2.—С. 3—15.
23. Панов В. В., Саркисян А. П. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения // За рубежная радиоэлектроника.—1993.—№ 10—12.—С. 3—11.
24. Питток Б., Акермен Т., Крутчен П. и др. Последствия ядерной войны. Физические и атмосферные эффекты. Пер. с англ. — М.: Мир, 1988.—392 с.
25. Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенберг В. Ю. О генерации электрических волн в верхней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия.—1990.—30, № 5.—С. 869—871.
26. Пономарев Е. А., Ерущенков А. И. Инфразвуковые волны в атмосфере Земли. (Обзор) // Изв. вузов. Радиофизика.—1977.—20, № 12.—С. 1773—1789.
27. Похотелов О. А., Липеровский В. А., Фомичев Ю. П. и др. Модификация ионосферы во время военных действий в зоне Персидского залива // ДАН.—1991.—321, № 6.—С. 1168—1172.
28. Пулинец С. А., Хегай В. В., Боярчук К. А., Ломоносов А. М. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // Успехи физ. наук.—1998.—168, № 5.—С. 582—589.
29. Риккетс Л. У., Бриджес Дж., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты: Пер. с англ. / Под ред. Н. Ухина. — М.: Атомиздат, 1979.—328 с.
30. Соловьев А. В., Тельпуховский Е. Д. Исследования инфразвуковых колебаний давления при маломасштабных пожарах // Изв. вузов. Физика.—2001.—№ 1.—С. 91—93.
31. Соловьев С. П., Сурков В. В. Электрические возмущения в приземном слое атмосферы, обусловленные воздушной ударной волной // Физика горения и взрыва.—1994.—30, № 1.—С. 117—121.
32. Соловьев С. П., Сурков В. В. Электростатическое поле и молнии, возникающие в газопылевом облаке продуктов взрыва // Геомагнетизм и аэрономия.—2000.—40, № 1.—С. 68—76.
33. Сорокин В. М., Чмырев В. М. Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф // Геомагнетизм и аэрономия.—2002.—42, № 6.—С. 821—830.
34. Харуэлл М., Хатчинсон Т., Кроппер У. и др. Последствия ядерной войны. Воздействие на экологию и сельское хозяйство. Пер. с англ. — М.: Мир, 1988.—551 с.
35. Черногор Л. Ф. Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта «Попередження» // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 1.—С. 38—47.
36. Ядерный взрыв в космосе, на земле и под землей. (Электромагнитный импульс ядерного взрыва). Сборник статей. Пер. с англ. / Под ред. С. Давыдова. — М.: Воениздат, 1974.—220 с.
37. Lin J. C. A Real and Present Wireless Danger // IEEE Antennas and Propagation Magazine.—April. 2000.—42, N 2.—P. 126—132.
38. Nickolaenko A. P. The rocket flare as a fair weather field converter into low frequency emission // J. Atmos. Electr.—1995.—15.—P. 5—10.
39. Rycroft M. J., Israelsson S., Price C. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.—2000.—62.—P. 1563—1576.

PHYSICAL PROCESSES IN THE NEAR-EARTH ENVIRONMENT ASSOCIATED WITH MARCH—APRIL 2003 IRAQ WAR

L.F.Chernogor

Atmospheric effects associated with rocket bombing attacks and ensuing fires are estimated. Energetics of physical processes involved and the mass of the dust, smoke, and chemicals which were ejected into the atmosphere are calculated. Disturbances in atmospheric electric fields as well as fluxes of acoustic gravity and electromagnetic waves are estimated. Ecological impacts on the atmosphere are discussed. The energetics of the secondary processes caused by solar radiation screening is established to exceed the energetics of the primary processes by three to five orders of magnitude. Oil well fires are noted to have the major ecological impact. The results demonstrate that effects of modern regional non-nuclear wars on the atmosphere may be significant.