

УДК 550.36+577.31

Л.Ф. Черногор

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Украина, г. Харьков

СОЛНЦЕ – МЕЖПЛАНЕТНАЯ СРЕДА – МАГНИТОСФЕРА – ИОНОСФЕРА – АТМОСФЕРА – ЗЕМЛЯ КАК ОТКРЫТАЯ НЕРАВНОВЕСНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. 2

Аннотация. Изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований, подтверждающих, что *образование Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля (СМСМИАЗ)* является сложной открытой динамической нелинейной системой.

Активные эксперименты (и их разновидности – аварии и катастрофы) в системе СМСМИАЗ показали ограниченность линейного описания реакции подсистем на мощное энерговыделение, позволили установить возможность возникновения крупномасштабных и глобальных возмущений при локальном и локализованном энерговыделении, а также выявить и идентифицировать типы волн, переносящих указанные возмущения.

Установлено, что высыпание энергичных частиц из магнитосферы в средних широтах сопровождается большинством нестационарных процессов в системе СМСМИАЗ

Ключевые слова: система, подсистема, солнечная система, частицы, открытая динамическая нелинейная система, возмущения, масштабы, аварии, катастрофы, энерговыделение, волны.

Введение

В первой части настоящей работы [1] перечислены основные положения системной парадигмы. Описаны главные свойства таких систем, как Солнца, межпланетная среда, магнитосфера, ионосфера, атмосфера, Земля, *Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (ЗАИМ)* и всей системы в целом СМСМИАЗ. К ним были отнесены – открытость, неравновесность, нелинейность. Там же были детально рассмотрены высокоэнергичные эффекты в этих системах.

Во второй части работы будут описаны эффекты в системе ЗАИМ как части системы СМСМИАЗ, сопровождающие активные эксперименты, крупномасштабные военные действия, аварии и катастрофы на военных объектах.

7 Активные эксперименты в системе ЗАИМ

Активные эксперименты (АЭ) оказались удобными для изучения как системы ЗАИМ в целом, так и взаимодействия ее подсистем. При этом становится возможным дозировать величину энерговыде-

ления, выбирать для него место и время, что обычно не возможно при исследовании естественных процессов в системе ЗАИМ [1 – 5]. Перечень источников, используемых в АЭ, и их основные параметры приведены в работах [2 – 6]. Ниже рассмотрим только некоторые из них.

7.1 Мощное радиоизлучение

Этот источник весьма удобен для проведения АЭ, поскольку он оказывает только электромагнитное воздействие на плазму и является экологически “чистым”. Воздействию **мощного радиоизлучения (МР)** на ионосферную и магнитосферную плазму посвящено большое количество работ (см., например, [7 – 10]).

Воздействуя МР на ионосферу и магнитосферу, можно существенно влиять на процессы в системе ЗАИМ и ее подсистемах. Для этой цели пригодны радиотехнические установки, излучающие в диапазоне от 1 кГц до 1 ГГц [11, 12]. Однако есть предпочтительные диапазоны радиоволн. К ним относятся следующие:

1) $f \approx 10\text{--}100$ кГц (гирорезонанс для волны необыкновенной поляризации в магнитосфере),

2) $f \approx 1,5$ МГц (гирорезонанс для волны необыкновенной поляризации в нижней ионосфере),

3) $f \approx 3\text{--}10$ МГц (*верхний гибридный резонанс (ВГР)* в области F ионосферы).

Рассмотрим эффекты воздействия МР подробнее.

Описываемые эффекты базируются на построенной нами численной модели нестационарного взаимодействия МР с ионосферной и магнитосферной плазмой. Расчеты выполнены для широкого диапазона эффективных мощностей, включая и значения, близкие к предельным (см., например, [12]). В качестве исходных использовались уравнения баланса температуры электронов, концентрации электронов N , положительных и отрицательных ионов N^\pm , а также укороченное уравнение для электрического поля радиоволны. Данные моделирования соответствовали результатам экспериментов, проведенных нами в средних и высоких широтах [13 – 15], а также результатам других исследователей (см., например, [10] и ссылки там).

ОНЧ-нагрев. Взаимодействию мощного ОНЧ-излучения с магнитосферной плазмой уделялось значительное внимание (см., например, [9] и ссылки там). При этом, как правило, частота волны $f \approx f_B$, т. е. рассматривалось резонансное циклотронное взаимодействие магнитосферных электронов с радиоволной. Условие резонанса выполняется в ограниченной области пространства. Здесь имеет место когерентное взаимодействие волн, генерация циклотронной неустойчивости, турбулизация и нагрев плазмы. Вследствие значительной теплопроводности электронного газа, постепенно нагревается вся силовая трубка, включающая возмущенный объем плазмы, и величина возмущений становится достаточно малой. Для резонансного воздействия достаточно поглощаемой мощности радиоволны $P_{ab} \sim 0,1\text{--}1$ МВт.

В работах [16, 17] кратко описаны результаты расчета омического нагрева электронов в ионосфере и магнитосфере при нерезонансном взаимодействии радиоволн

необыкновенной поляризации с частотами $f \sim 1$ кГц – 1 МГц. Показано, что в дневное время при $P_{ab} = 10$ МВт и при использовании оптимальной частоты $f_0 \sim 10$ кГц увеличение температуры электронов $\Delta T_e \sim 10^3$ К в магнитосфере и $\sim 0,1\text{--}10$ К в ионосфере. В ночное время $f_0 \sim 0,1$ МГц, а $\Delta T_e \sim 10^3$ К в нижней части ионосферы и $\sim 100\text{--}300$ К в средней и внешней ионосфере, а также в магнитосфере (табл. 1 приложения). Тепловые возмущения носят нестационарный характер (характерное время $\sim 10^3$ с). Это обусловлено существенным различием времени становления T_e и N . Вначале нагревается ионосфера (за время $10^{-2}\text{--}10^2$ с соответственно на высотах 60–1000 км) и вершина магнитной силовой трубки (за время $\sim 10^3$ с). Затем часть тепла распространяется от вершины трубки к ее основанию ($z \sim 1000$ км). Время распространения зависит от длины силовой линии и составляет не менее нескольких тысяч секунд.

Нагрев плазмы приводит к росту концентрации электронов в нижней ионосфере (до десятков процентов) и ее уменьшению на высотах $z \geq 200\text{--}250$ км (тоже до десятков процентов).

Описанные первичные процессы приводят к изменению параметров подсистем, нарушению их взаимодействия и к появлению вторичных процессов (модуляции ионосферных токов, генерации электромагнитных полей, высыпанию энергичных электронов из магнитосферы и др.).

Гирорезонансный нагрев. Изложим кратко результаты моделирования взаимодействия МР на гирочастоте электронов с плазмой нижней ионосферы. Процесс нагрева электронов является нестационарным. Сначала (при $t \leq 0,1\text{--}1$ с) T_e увеличивается и достигает первого квазистационарного значения. При этом $N \approx N_0$. Затем начинается уменьшение N , обусловленное активизацией процесса прилипания электронов, уменьшается поглощение радиоволны и T_e возрастает, а при $t \sim 1\text{--}10$ с достигает второго квазистационарного значения. Однако при $t > 10\text{--}10^2$ с T_e уже начинает уменьшаться из-за роста N в результате замедления процесса рекомбинации электронов и роста нелинейного поглоще-

ния радиоволны. При $t \approx 10^4$ с T_e принимает стационарное значение.

Результаты расчета величины нагрева электронов для различных высот (подсистем) системы ЗАИМ ($L=2$) в зависимости от частоты мощного радиоизлучения приведены в таблице 1 приложения.

Профиль $\Delta T_e(z)$ имеет максимум в D-области ионосферы. Здесь величина $\Delta T_e/T_{e0}$ достигает гигантских значений, близких к 50–60 при $PG=10$ ГВт (P – мощность радиопередающего устройства, G – коэффициент усиления антенны). Заметим, что близкие оценки $\Delta T_e/T_{e0} \approx 20-40$ при $PG=1$ ГВт получены авторами работы [18]. В наших расчетах высота максимума ΔT_e увеличивается от 70–78 км днем и ночью соответственно. Интересно, что при $PG \approx 0,1-10$ ГВт оба стационарных уровня ΔT_e сливаются в один. В ночное время величина ΔT_e несколько больше, чем днем, однако концентрация электронов при этом крайне незначительна.

Процесс возмущения N и N^\pm также нестационарен. Сначала N уменьшается на десятки процентов и через 1–50 с достигает квазистационарного значения. Стационарное состояние с $N > N_0$ наступает спустя 10^2-10^4 с.

Минимальное возмущение N имеет место при $z=70-50$ км днем и $z=75-50$ км ночью для $PG=0,1-10$ ГВт соответственно. Максимальное возмущение N возникает на высотах 70–80 км для дня и ночи и зависит от PG . От эффективной мощности также зависит характер возмущений N . Во-первых, с ростом PG увеличиваются значения N_{\min} (для $PG < 1$ ГВт) и N_{\max} , первое из них составляет $(0,9-0,7)N_0$, а второе – около $(1,04-6)N_0$ для $PG \approx 1-10^3$ МВт. Во-вторых, при $PG \approx 0,1-10$ ГВт ожидается подавление процесса прилипания электронов и $N \approx N_0$. В-третьих, при $PG \geq 1$ ГВт появляются две области с увеличенными значениями N . Первая возникает через $\sim 0,01$ с и со временем перемещается вверх, а вторая – через $\sim 10^2$ с и движется вниз. Примерно через 10^4 с обе области сливаются в одну. При этом $N/N_0 \approx 5-6$ для $PG=1-10$ ГВт.

Резонансный нагрев. Рассмотрим возмущения ионосферной плазмы декамет-

ровыми радиоволнами обыкновенной поляризации. Волна отражается на высоте, где плазменная частота $f_p=f$. На уровне, где плазменная частота равна $(f^2 - f_B^2)^{1/2}$, имеет место ВГР [19]. Вертикально падающая волна накачки, рассеиваясь на затравочных неоднородностях электронной концентрации, передает свою энергию медленным плазменным волнам. Неоднородности N усиливаются, и интенсивность рассеянной волны увеличивается. В результате этого развивается тепловая параметрическая неустойчивость, энергия волны накачки диссипирует, а плазма нагревается. Такая диссипация получила название аномального поглощения. Около 86 % дошедшей до уровня ВГР энергии поглощается в слое плазмы толщиной $2L_a$. Можно показать, что максимальное значение $L_a \approx 10-70$ км при $f \approx 3-10$ МГц соответственно.

Оказывается, что эффективность нагрева в области ВГР примерно в 6–7 раз больше, чем проходящим излучением с теми же параметрами.

Величина нагрева электронов $\theta = T_e/T_{e0}$ существенно зависит от времени суток и ориентации диаграммы направленности по отношению к геомагнитному полю. При вертикальном зондировании для низких и средних, а также высоких широт величину θ можно оценить соответственно из соотношений:

$$\theta^{-3/2}(\theta - 1) \frac{L_\perp \sin \alpha + 2L_{T0}\theta^2}{L_\perp \sin \alpha + 2L_{T0}} = \frac{\Pi_{ab}}{\Pi_{c1}}, \quad (1)$$

$$\theta^{-3/2}(\theta - 1) \frac{L_a + L_{T0}\theta^2}{L_a + L_{T0}} = \frac{\Pi_{ab}}{\Pi_{c2}}, \quad (2)$$

где $L_\perp \approx z \Delta \alpha$, $\Delta \alpha$ – ширина диаграммы направленности антенны,

$L_{T0} = (\kappa_{e0} t_{T0})^{1/2}$ – масштаб теплопроводности, κ_{e0} – коэффициент температуропроводности,

$t_{T0} = (\delta_0 v_0)^{-1}$ – время становления T_e ,

v_0 – частота соударений электронов с ионами,

$\delta_0 \approx 10^{-4}$ – относительная доля энергии, теряемая при одном соударении,

$\Pi_{ab} = \eta_{ab} PG / 4\pi z^2$ – плотность потока поглощаемой мощности радиоволны на высоте z ,

η_{ab} – коэффициент, учитывающий потери мощности вне области аномального поглощения волны,

α – угол между волновым вектором и \mathbf{B} , $\Pi_{c1,2}$ – критическая плотность потока энергии, служащая мерой степени нагрева электронов (индекс 1 соответствует низким и средним широтам, а индекс 2 – высоким широтам). При $N \approx N_0$ имеем

$$\Pi_{c1} \approx 2\varepsilon_{e0}N_0L_a t_{T0}^{-1}(\sin \alpha + 2L_{T0}/L_{\perp}),$$

$$\Pi_{c2} \approx 2\varepsilon_{e0}N_0(L_a + L_{T0})t_{T0}^{-1},$$

где $\varepsilon_{e0}=3kT_{e0}/2$ – тепловая энергия электрона. В уравнениях (1), (2) учтено, что потери тепла, связанные с соударениями электронов и их теплопроводностью, примерно равны. Кроме того, считалось, что длительность воздействия τ намного больше времени нагрева электронов $t_T=t_{T0}\theta^2$ (1–2 мин), но меньше времени диффузии плазмы $t_D=L_D^2/D_a$, где L_D – характерный масштаб диффузии, D_a – коэффициент амбиполярной диффузии. Обычно на высотах 300–350 км $t_D \approx 15$ –5 мин соответственно.

Для обеспечения $\theta=2$ потребуются потоки Π_{ab} , результаты оценок которых приведены в табл. 2 приложения. Считалось, что $G=185$, $\eta_{ab} \approx 0,7$ и $0,1$ ночью и днем. Из табл. 2 приложения видно, что значения Π_{ab} в ночное время слабо зависят от широты и составляют около 10^{-5} Вт/м². В дневное время Π_{ab} примерно равны 10^{-5} и $3 \cdot 10^{-4}$ Вт/м² для низких и высоких широт соответственно. В первом случае $PG \approx 10$ – 15 МВт, а во втором – порядка 100 и 5600 МВт. Это означает, что большие возмущения T_e , а при $\tau \geq t_D$ и N , легко достигаются в ночное время и затруднены или невозможны при существующих энергетических потенциалах радиосистем в дневное время.

Например, в условиях низкоширотной ионосферы, при $f=3,175$ МГц и сравнительно небольшом значении $PG = 60$ МВт наши оценки дают, что в ночное время $\theta \approx 3$. В работе [20] действительно обнаружены такие значительные возмущения температуры электронов ($T_{e0} \approx 800$ К, $T_e = 2400$ К). Нагрев вызвал также вытеснение плазмы на высотах 250–400 км, при этом N уменьшалось до $N_{\min} \approx 0,3N_0$.

Сильный нагрев электронов в ночное время приводит к генерации и распространению из низкоширотной ионосферы тепловой волны с резким градиентом температуры T_e на ее переднем фронте [19]. Скорость этой волны при достаточно больших θ можно оценить по формуле:

$$u = \frac{\Pi_{ab}}{\Pi_c} \frac{L_a}{(\theta-1)t_c} = \frac{\Pi_{ab}}{\Pi_c} \frac{L_a \theta^{5/2}}{(\theta-1)t_{c0}},$$

где $t_c = t_{c0}\theta^{5/2}$ – время становления T_e за счет теплопроводности. Для ночных условий при $\Pi_{ab}/\Pi_c \approx 1,5$ –2,4, $t_{c0} \approx 0$ с, $L_a = 60$ км имеем $\theta \approx 3$ –4 и $u \approx 10$ –20 км/с. Такое значение u соответствует результатам численных расчетов [19].

Требуемые значения плотности потока поглощаемой мощности радиоволны и эффективной мощности радиосистемы для увеличения температуры электронов в области ВГР в два раза представлены в таблице 2 приложения.

Вытеснение плазмы из нагретой области приведет к “продавливанию” ночной ионосферы мощным радиоизлучением и опустошению плазмосферы, а также к генерации уединенной нелинейной ионно-звуковой волны сжатия. Ее скорость равна [19]:

$$v(N) = c_{si}(1 + \ln N/N_0),$$

где $c_{si} = \sqrt{k(T_e + T_i)/m_i}$. В плазмосфере $c_{si} \approx 5$ км/с, а $v(N) \approx 10$ км/с при $N/N_0 \approx 3$.

В дневных условиях в F-области ионосферы $\Delta T_e/T_{e0} \approx 0,2$ –0,3, а $N/N_0 \approx 0,9$, поэтому описанные выше эффекты отсутствуют [19]. Днем главным процессом является увеличение плотности потока плазмы из ионосферы в плазмосферу от $5 \cdot 10^{11}$ до $2 \cdot 10^{12}$ м⁻²с⁻¹ из ионосферы в плазмосферу и значительное обогащение последней [19].

В условиях среднеширотной ионосферы эффекты в целом подобны, но есть и отличия, связанные со значительной длиной магнитной силовой трубки [21]. Во-первых, в плазмосфере не ожидается появление тепловой волны, достигающей сопряженной ионосферы даже при $PG=1000$ МВт. Во-вторых, время распространения ионно-звуковой волны сжатия увеличивается до $4 \cdot 10^3$ с, т.е. на порядок. В-третьих,

размер области опустошенной плазмосферы не превышает 1/3 длины силовой трубки. Ясно, что перечисленные особенности еще сильнее должны проявиться в высоких широтах.

В работе [22] описан эффект магнитного зенита. Этот эффект заключается в сильном увеличении возмущения параметров ионосферы, когда мощный пучок радиоволн в результате нелинейного процесса заперт в каверне и направлен примерно вдоль силовых линий. Эффект обусловлен самофокусировкой радиоволны на вытянутых неоднородностях ионосферы и ее аномальным нагревом. Последний приводит к образованию каверны с характерным размером в сотни километров. Важно, что эффект магнитного зенита сопровождается потоком сверхтепловых электронов с энергией около 10 эВ и плотностью $\Pi_e \sim 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в магнитосферу, искусственной “авророй” на высотах $z \approx 300$ км.

Нерезонансный ВЧ-нагрев. При поглощении радиоволны с той же частотой (3–10 МГц) ниже уровня ВГР эффекты качественно отличаются. В дневное время основная мощность радиоволны диссипирует в D-области ионосферы. Здесь при $PG=0,1-1$ ГВт $\theta \approx 50-60$, а $N/N_0 \approx 7-8$, т.е. также ожидаются гигантские возмущения, близкие к предельно возможным. В то же время в E- и F-областях эти возмущения не превышают нескольких сотен и десятков процентов соответственно. Примерно такие же возмущения должны иметь место и в ночное время, хотя величина коэффициента поглощения уменьшается почти на порядок. Как и при воздействии радиоволны на гирочастоте, процессы возмущения T_e , N и N^\pm нестационарны. Это связано с существенным различием времен становления T_e и N , а также с различной скоростью химических реакций [11, 12].

ОВЧ-, УВЧ- и СВЧ-нагрев. При увеличении частоты радиоволны ее коэффициент поглощения убывает примерно как f^{-2} . Поэтому для воздействия на ионосферу радиосистемы с $f \geq 10$ МГц практически не применяются. При этом, однако, необходимо иметь ввиду, что и направленность антенны быстро растет с ростом частоты

($G \sim f^2$) Поэтому относительный энергетический потенциал, определяющий степень воздействия на околоземную плазму и равный PG/f^2 (при $f \geq 10$ МГц), от частоты практически не зависит. Именно на это обратил внимание автор статьи в начале 1970-х годов и показал, что существовавшие тогда радиосистемы метрового и дециметрового диапазонов ($f=30-3000$ МГц) способны вызывать очень значительные возмущения T_e . Так, при $P=4-6$ МВт и $G=10^4-10^5$ температура электронов T_e в нижней ионосфере должна увеличиваться в 20–40 раз, в E- и F-областях – в 2–4 и 1,1–1,5 раза соответственно. Поскольку радиосистемы указанных диапазонов являлись радарными с длительностью импульса τ менее 2–3 мс, величина возмущения N для них не может превышать 1–10%.

Стохастический нагрев. Эффективность нагрева ионосферы на высотах 100–300 км невелика потому, что здесь $\tau \ll t_T$. Для ее увеличения целесообразно использовать радиоизлучение с широкополосной стохастической модуляцией [23, 24]. Можно показать, что в случае греющего поля с автокорреляционной функцией для огибающей в виде

$$R_E(t', t'') = \langle E(t')E(t'') \rangle = E_0^2 e^{-|t'-t''|/\tau_c}$$

в стационарном случае ($\tau \gg t_T$) справедливо соотношение:

$$\frac{\Delta T_{e\infty}}{T_{e0}} = \frac{\Pi_P}{\Pi_{st}} \frac{v_{ef}}{v},$$

$$\Pi_{st} = \frac{3kT_{e0} m \delta_0 (\omega^2 + v_{ef}^2)}{2e^2 Z_0},$$

где $v_{ef} = v + v_c$, $v_c = \tau_c^{-1}$, τ_c – интервал корреляции, $Z_0 = 120\pi$ Ом – сопротивление свободного пространства, Π_{st} – характерная плотность потока энергии, определяющая величину нагрева, Π_P – плотность потока энергии радиоизлучения, $\omega = 2\pi f$.

Для импульсных установок с $\tau \ll t_T = (\delta_0 v)^{-1}$

$$\frac{\Delta T_e}{T_{e0}} = \frac{T_{e\infty}}{T_{e0}} \frac{\tau}{\tau_T} = \frac{\Pi_P}{\Pi_{st}} \delta_0 v_{ef} \tau.$$

В F-области ионосферы $v \ll v_c$ и $v_{ef} \approx v_c$. Для повышения эффективности нагрева радиоизлучением со стохастической моду-

ляцией целесообразно полосу частот ν_c увеличить вплоть до $0,1f$. Тогда

$$\frac{\Delta T_e}{T_{e0}} = \frac{\Pi_p}{\Pi_{st}} \delta_0 B_s, \quad (3)$$

где $B_s = \nu_c \approx 0,1f\tau$ – база сигнала. Из формулы (3) видно, что $\Delta T_e/T_{e0} \propto B_s, f^{-1}$. С учетом теплопроводности электронов относительная температура электронов в центре диаграммы направленности антенны $\theta_0 = \theta(0)$ дается соотношением

$$\theta_0^2 (\theta_0 - 1) = I_0, \quad I_0 \approx \frac{\Pi_p}{\Pi_{st}} \delta_0 B_s \frac{L_{\perp}}{2L_{T0}}. \quad (4)$$

При $I_0 \ll 1$ имеем $\theta_0 \approx 1 + I_0$, а при $I_0 \gg 1$ величина $\theta_0 \approx I_0^{1/2} \propto (PGB_s)^{1/3}$. Выполним оценки по формуле (4) для параметров радара в обсерватории Джикамарка (США): $P=6$ МВт, $G=3 \cdot 10^4$, $f=50$ МГц, $\tau=3$ мс. На высоте 300 км при $B_s=1,5 \cdot 10^4$ имеем $\Pi_p/\Pi_{st} \approx 3,7$, $\Delta T_e/T_{e0} \approx 5,55$ (без учета теплопроводности), а с ее учетом $(\Delta T_e/T_{e0}) \approx 0,38$ при $L_{\perp} \approx 5$ км, $L_T = L_{T0}\theta_0^2$ и $L_{T0} \approx 20$ км.

Таким образом, используя радиосигналы со стохастической или псевдослучайной модуляцией, можно существенно увеличить T_e в F-области ионосферы, включая ее внешнюю часть. Поскольку $t_T \gg T_r \approx 10^{-2}$ с, где T_r – период повторения импульсов, возмущения T_e от отдельных импульсов (а их количество $t_T/T_r \approx 1000$) будут накапливаться, величина нагрева будет расти, тепло будет распространяться вдоль магнитной силовой линии в область, где время релаксации T_e еще больше. Так должен возникнуть поток тепла, а вместе с ним и поток вытесняемой плазмы в плазмосферу. В отличие от нагрева F-области радиоизлучением с $f \approx 3-10$ МГц, при воздействии МР с $f \approx 10-1000$ МГц значительное возмущение плазмосферы следует ожидать как в ночное, так и в дневное время.

Генерация искусственных геомагнитных пульсаций. Для изучения ионосферно-магнитосферных связей полезной оказывается модуляция ионосферных токов мощным радиоизлучением. Модулированная токовая струя эквивалентна антенне: она излучает сигналы на частоте модуляции МР. Так, например, можно генерировать геомагнитные пульсации в диапа-

зоне периодов $0,1-10^2$ с [10, 25 – 27]. Известно, что эти пульсации эффективно взаимодействуют с энергичными протонами радиационных поясов, отбирая у них энергию и вызывая их высыпание в атмосферу [28].

Для увеличения уровня геомагнитных пульсаций целесообразно использовать радиоволны, которые почти полностью поглощаются в области токовой струи (на высотах $\sim 110-130$ км). Для этой же цели пригодны радиоволны с $f \approx 1-2$ МГц в ночное время и $f \approx 3-4$ МГц в дневное время. В работе [26] показано, что при $P_{ab} \approx 1$ МВт в области токовой струи $\theta \approx 2-14$ для дня и ночи соответственно. При плотности холловского тока $j_H = 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-6}$ А/м² ночью и днем имеем соответственно величины амплитуд среднеширотных геомагнитных пульсаций δB с периодами $T \geq 10^2$ с порядка 4–40 пТл. При этом амплитуда электрической компоненты альвеновской волны $\delta E \approx 4-40$ мкВ/м. В высоких широтах амплитуда ионосферного квазистатического поля примерно в 30 раз больше и достигает величины ~ 50 мВ/м. Во столько же раз увеличиваются j_H , δB и δE . Если к тому же в высоких широтах за счет естественных возмущений на высотах 110–130 км N увеличивается до значений $\sim 10^{12}$ м⁻³, то указанные величины в итоге увеличатся до 300 раз, т. е. δB и δE достигнут значений ~ 10 нТл и 10 мВ/м. Вторая причина, которая приводит к таким необычайно большим значениям δB и δE , – ионосферно-магнитосферное взаимодействие [11, 12, 29]. Именно такие значения δB при $T=10$ мин наблюдались в высоких широтах авторами [30]. Такие амплитуды можно назвать экзотическими. Им соответствует плотность энергии $\varepsilon_M = (\delta B)^2/2\mu_0 \approx 5 \cdot 10^{-11}$ Дж/м³ и плотность потока энергии $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ Вт/м². Этих значений достаточно для оказания значительного влияния на магнитосферные энергичные протоны и перестройки ионосферно-магнитосферного взаимодействия.

В работах [31, 32] описаны геомагнитные пульсации, сопровождающие воздействие радиоизлучения на ионосферную плазму. Скорее всего, эти пульсации имели естественное происхождение. Одна из при-

чин – недостаточно большая (около 40 МВт) эффективная мощность радиоизлучения.

Таким образом, МР может существенно изменять параметры подсистем, нарушая установившиеся процессы взаимодействия между ними. Вместе с тем, роль МР может быть и иной. Оно может приводить к распространению возмущений в горизонтальном направлении.

Крупномасштабные возмущения. Впервые возмущения подобного рода (автор назвал их крупномасштабными, их горизонтальный размер достигал ~1000 км) наблюдались нами в начале 1970-х годов при воздействии на ионосферу МР, производимого системой НИИ Радио (г. Москва) [11, 12, 34]. С вводом в эксплуатацию установки “Сура” (вблизи г. Новгород) воздействие на ионосферу стало регулярным. Это дало возможность систематически наблюдать крупномасштабные возмущения вблизи г. Харькова. Они продолжались нами в течение почти 10 лет. Наконец, на рубеже 1980 – 1990-х годов выполнены немногочисленные наблюдения в течение работы установки в Тромсе (Норвегия). Предпринимались также попытки сопровождать работу комплекса МР НААРР (Аляска, США). Таким образом, удаления R от места излучения мощных радиоволн от пункта наблюдения составляли ~100, 700, 1000, 2000 и 10000 км. Эффективная мощность нагревных стендов изменялась от 10 до 380 МВт, частота – от 1,35 до 8 МГц. Для диагностики использовались методы частичных отражений ($z \approx 60$ –100 км), вертикального доплеровского зондирования ($z \approx 100$ –300 км), высочувствительный магнитометр, сеть ионосферных станций бывшего СССР, многочастотное зондирование на наклонных радиотрассах ($f = 3$ кГц – 30 МГц) различной ориентации и протяженности (от ~100 до 10000 км), прием и анализ радишумов в диапазонах 1 – 30, ~150–160 и 2000–4000 МГц и др. Продолжительность наблюдений всеми перечисленными методами составила около 10000 ч. Измерения обычно проводились в Радиофизической обсерватории (РФО) ХНУ имени В. Н. Каразина [11, 12, 28, 31 – 33].

В результате анализа большого объема наблюдательных данных подтверждено, что в 1970-е годы нами экспериментально установлено и теоретически объяснено неизвестное ранее явление возникновения интенсивных (~100–1000%) крупномасштабных и слабых (~1–10%) глобальных аperiодических возмущений электронной концентрации в нижней ионосфере и волновых возмущений в нижней и средней ионосфере, сопровождаемых вариациями геомагнитного поля, которые в первом случае стимулированы, а во втором случае вызваны воздействием мощного нестационарного радиоизлучения декаметрового и гектометрового диапазонов [11, 12].

Аperiодические процессы в нижней ионосфере (D-области) связаны с перестройкой взаимодействий в системе ЗАИМ и высыпанием энергичных частиц из радиационного пояса. Время запаздывания возмущения изменялось от 5 до 15 мин, а продолжительность – от единиц до десятков минут в зависимости от режимов работы нагревного стенда и состояния радиационного пояса. Добавим, что проявление эффекта высыпания энергичных частиц в E- и F-областях ионосферы, по-видимому, наблюдались автором [35].

Пример аperiодических возмущений в D-области ионосферы описан в [11, 12]. Возмущающая радиосистема расположена вблизи г. Москва, а зондирующая – вблизи г. Харьков (расстояние около 700 км). Измерения флуктуаций геомагнитного поля проведены в обсерватории Борок (Ярославская обл.). Режим излучения возмущающей установки: 15 мин эффективная мощность $P_1 G_1 = 80$ МВт, 15 мин $P_1 G_1 = 40$ МВт, далее пауза 15 мин; частота $f_1 = 5,905$ МГц, амплитудная модуляция колебанием с частотой 1 кГц, глубина модуляции 60%. Измерения проведены 20 ноября 1986 г. Оказалось, что после включения мощного радиоизлучения интенсивность обратно-рассеянных неоднородностями среды сигналов существенно увеличилась. Возмущению неоднородной структуры нижней ионосферы сопутствовало значительное (10 – 100%) увеличение концентрации электронов, вызванное, скорее всего, нарушением сло-

жившегося до возмущения ионосферно-магнитосферного взаимодействия.

Волновые возмущения относительно уверенно фиксировались лишь при $R \approx 100$ –1000 км. Их кажущаяся скорость составляла $\sim 0,3$, $0,3$ – $0,4$ и $0,5$ – $0,7$ км/с в D-, E- и F-областях ионосферы соответственно. Относительная амплитуда $\Delta N/N \approx 1$ –5%, периоды $T \approx 10$ –30 мин, продолжительность $\sim 0,5$ –3 ч для нижней и средней ионосферы соответственно. Волновые возмущения заметно усиливались при периодическом нагреве ионосферы (например, при включениях установки на 10 мин с 10 минутными паузами) [11, 12, 36].

Примеры регистрации волновых возмущений в нижней части области F, сопутствовавших работе мощного нагревного стенда описаны [33]. При этом $R \approx 1000$ км. Оказалось, что мощное периодическое радиоизлучение приводит к генерации ПИВ. Последние являются результатом генерации ВГВ и активизации взаимодействия подсистем в системе ЗАИМ.

В работе [36] описаны вариации фазы ОНЧ сигналов на радиотрассе, удаленной от мощной радиосистемы на расстояние 1000 – 2000 км.

Результаты экспериментов и теоретических исследований, выполненные в 2009 – 2012 гг., подтверждают сделанные ранее выводы [36 – 44].

Глобальные возмущения. Автором оценена также возможность глобального нагрева околоземной плазмы вещательными, связными и другого назначения радиопередающими устройствами, суммарная мощность которых в диапазонах миллиметровых, километровых, гектометровых и декаметровых радиоволн составляет несколько сотен мегаватт [12]. Поглощение этой мощности в ионосфере над экономически и технически развитыми районами (Европа, Северная Америка) должно привести к увеличению T_e и N на несколько процентов. Настолько же изменится и проводимость плазмы σ_p в области ионосферной токовой струи. Это вызывает генерацию поля поляризации с напряженностью 0,1–1 мВ/м. При характерных размерах возмущенной области ~ 3000 км это должно привести к изменению “поперечной” энер-

гии электронов в радиационном поясе на 0,3–3 кэВ. Таких изменений обычно достаточно для высыпания части электронов в атмосферу и нарушения сложившегося характера взаимодействия между ионосферой и магнитосферой.

Важно, что глобальный нагрев является нестационарным и периодическим. Дело в том, что большинство вещательных и некоторых других радиосредств включается или выключается преимущественно по окончании текущего часа, несколько реже – в 15, 30 и 45 мин каждого часа. Это приводит к генерации возмущений T_e , N и σ_p с периодом 15 мин. С тем же периодом возмущаются и магнитосферные энергичные электроны, а значит, и связанные с ними процессы. Скорее всего, эти процессы наблюдались авторами [45, 46]. Важно, что время запаздывания упомянутых процессов составляло 1–3 мин, т.е. примерно равнялось времени становления концентрации электронов в области токовой струи соответственно в дневное и ночное время.

Добавим, что подобными причинами (значительным уменьшением энергопотребления, а значит и уровня излучения линий энергопередач) вызван “эффект выходных дней”, обнаруженный по вариациям геомагнитного поля [46].

Глобальные процессы, стимулированные МР, наблюдались также на искусственных спутниках Земли [47 – 49].

Следовательно, мощное радиоизлучение различных диапазонов является удобным и эффективным инструментом для исследования мало изученных взаимодействий между подсистемами в системе ЗАИМ (в основном, между ионосферой и магнитосферой) и подтверждения основных идей системной парадигмы.

7.2 Старты и полеты космических аппаратов (КА)

Ракеты с включенными двигателями оказывают на околоземную среду газодинамическое, тепловое, электромагнитное и химическое воздействия. Результаты исследований суммированы, в частности, в справочном пособии [50] и книгах [51, 52].

В настоящей работе приводятся в основном результаты исследований, полученные с участием автора (см. [2 – 5, 53 – 81]).

Нами выполнен анализ наблюдений более чем 5000 стартов КА (свыше 20 типов ракет мощностью 10^7 – 10^{11} Вт) с 12 космодромов (в том числе и аварийных запусков), свыше 100 посадок КА и 3 падений орбитальных станций. Наблюдения осуществлялись, как правило, в РФО Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина в 1970–2012 гг. с использованием перечисленных выше методов, а также с привлечением харьковского радара некогерентного рассеяния. Ранее наблюдения проводились в экспедиционных условиях. Расстояние R от обсерватории до космодромов изменялось в пределах 750–10000 км.

Основной целью этих наблюдений было выявление возможности возникновения крупномасштабных и глобальных возмущений в геокосмосе, исследование механизмов их генерации и распространения, а также особенностей взаимодействия подсистем в системе ЗАИМ.

Многочисленные примеры радиофизических и геомагнитных эффектов СР описаны в монографии [52].

Главным итогом проведенных исследований явилось установление факта возникновения крупномасштабных ($R \leq 2500$ км) и глобальных ($R \sim 10000$ км) возмущений в околоземной плазме при стартах и полетах (посадках) достаточно крупных КА (с начальной массой не менее 100 т).

К крупномасштабным возмущениям можем отнести и долгоживущие ионосферные “дыры” на высотах F-области ионосферы. В отличие от них, “озоновые дыры” имеют горизонтальный и вертикальный масштабы, не превышающие единиц – десятков километров.

Результаты наблюдения вариаций геомагнитного поля, сопутствующих стартам ракет с различных космодромов мира описаны в [52, 67, 70 – 76, 79 – 81].

Нами идентифицированы скорости распространения возмущений. Минимальная скорость составляет порядка 0,3 – 0,8 км/с для нижней и средней ионосферы соответственно. Она примерно равняется ско-

рости ударных акустических волн и ВГВ с периодами 5 – 60 мин (для D-, E- и F- областей соответственно). Продолжительность реакции на ударную волну обычно составляла 2 – 10 мин и наблюдалась при помощи доплеровского радара на расстояниях $R \leq 2500$ км. На таких же удалениях регистрировались и ВГВ, их продолжительность составляла 1–2 ч.

Более быстрые возмущения переносились со скоростью 2–4 км/с. Она соответствует скорости медленных МГД-волн [82]. Нельзя исключать из рассмотрения волны, описанные в [83 – 85], которые можно назвать магнитоградиентными волнами (волнами Абурджаниа – Хантадзе). Их скорость в течение суток изменяется от нескольких долей до нескольких десятков км/с.

При стартах КА на космодромах США и Куру (Франция) иногда также регистрировались возмущения с $v \approx 10$ –50 км/с. Их переносчиком, возможно, являются гиротропные волны [82].

Особый интерес представляют возмущения, запаздывающие на несколько минут относительно стартов ракет на удалениях $R \sim 1000$ –10000 км. Они наблюдались в нижней ионосфере методом частичных отражений, продолжительность возмущений редко превышала 1–10 мин. Скорее всего, эти возмущения вызваны высыпанием энергичных электронов из радиационного пояса в результате нарушения сложившегося характера взаимодействия ионосферы с магнитосферой [50 – 59].

При посадке американских КА “Space Shuttle” нами также наблюдались возмущения с $v \approx 2$ –4 и 10–30 км [52, 58].

Ионосферные эффекты стартов и полетов КА сопровождалась генерацией геомагнитных пульсаций [52, 79 – 81]. Результаты этих работ также свидетельствуют об активном взаимодействии подсистем в системе ЗАИМ.

7.3 Мощные взрывы

Отдельные эффекты при воздействии мощных взрывов на околоземную среду описаны в работе [86].

Высотные ядерные взрывы оказывают на среду ионизирующее, тепловое, га-

зодинамическое, электромагнитное, химическое и другие воздействия [87]. В виду “комплексности” воздействия и большого энерговыделения ($\sim 10^{12}$ – 10^{17} Дж) ядерные взрывы относятся к наиболее интересным источникам для исследования и моделирования процессов в системе ЗАИМ. К сожалению, их применение крайне нежелательно по экологическим соображениям.

Химические взрывы в атмосфере оказывают в основном газодинамическое воздействие на среду: генерируемая ударная волна переходит в акустическую, которая вызывает возмущения в атмосфере, ионосфере и опосредованно в магнитосфере. Химические взрывы, как ожидалось, должны быть эффективными для исследования взаимодействия между подсистемами в системе ЗАИМ.

Ставший классическим проект “МАССА” был первым из проектов, направленных на комплексное экспериментальное исследование и теоретическое изучение динамических процессов в подсистемах системы ЗАИМ [88]. Химический взрыв заряда массой 251 т был произведен 28 ноября 1981 г. в 02:31 UT в точке с координатами $43^{\circ}48'$ с. ш., $76^{\circ}51'$ в. д. В месте взрыва длительность акустического импульса τ_a была ~ 1 мс, а на расстоянии $R \sim 10$ км – уже около 1 с. В F-области ионосферы она увеличилась до 1 мин. После входа акустического импульса в ионосферу наблюдалась генерация шумовых электромагнитных сигналов с $f \sim 10$ кГц. Эти сигналы, распространяясь вдоль магнитных силовых линий, достигли магнитосферы, где возникли токовые струи и вариации геомагнитного поля с $\delta B \sim 10$ нТл.

Кроме того, возмущения от взрыва распространялись в горизонтальном направлении со скоростью 1–10 км/с (в зависимости от ориентации направления распространения по отношению к вектору **V**).

К новым и неожиданным эффектам, зарегистрированным в ходе выполнения проекта “МАССА”, относятся следующие.

1) Генерация аномально мощного электромагнитного импульса с $\tau \approx 0,1$ с, $\delta B \approx 117$ нТл и $\delta E = 110$ мВ/м, обнаруженного при помощи ИСЗ “Ореол-3” (высота 800 км) на расстоянии около 700 км южнее

магнитной силовой трубки взрыва. Эффект усиления магнитного сигнала авторы [89 – 91] объяснили параметрическим взаимодействием с импульсом накачки, порождаемым акустическим импульсом.

2) Возмущение в плазме нижней ионосферы с периодами около 1 с [88].

3) Потоки энергичных электронов из радиационного пояса.

Последующий анализ результатов проекта “МАССА” и ряда ему подобных привел к мысли о необходимости создания нелинейных моделей связи между движениями в нейтральной атмосфере и электромагнитными возмущениями в ионосфере и магнитосфере [90, 91].

Нами проведен анализ последствий взрывов по результатам наблюдений, выполненных в РФО Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина в 1970 – 1980-е годы. Взрывы производились в СССР (полигоны Новая Земля, Семипалатинск, Капустин Яр), США (полигон Невада) и Китае. Энерговыделение при подземных ядерных взрывах (по наблюдениям 55 событий) изменялось от ~ 1 до 120 кт, при химических взрывах (11 событий) – от 1 до 10 т и подрывах ракет СС-20 (всего 24) – от 0,01–0,1 кт [3, 5, 92].

Выполнен также анализ наблюдений последствий взрыва КА “Челленджер” 28 января 1986 г. в 08:39 UT у мыса Канаверал (США), химического взрыва (0.12 кт) в Арзамасе-16 (Россия) 4 июня 1988 г. в 05:40 UT и химического взрыва (0.01 кт) в Павлограде (Украина) 12 мая 1988 г. в 03:15 UT.

Удаление от места взрыва в упомянутых выше наблюдениях изменялось от 200 до 10000 км. Лучше других регистрировались возмущения, имевшие скорость $v \approx 0,3$ – $0,7$ км/с (в нижней и средней ионосфере соответственно) и только при $R \leq 1000$ км. Сравнительно редко ($\sim 30\%$) и не очень уверенно наблюдались возмущения с $v \approx 2$ – 4 км/с при удалениях $R \sim 1000$ – 10000 км. Еще реже ($\sim 10\%$) на тех же удалениях фиксировались процессы с $v \approx 10$ – 50 км/с.

По-видимому, указанные возмущения переносились при помощи уже упомянутых типов волн и, кроме того, сейсмическими волнами, имеющими скорость 3–4

км/с. При мощных подземных ядерных взрывах их роль была значительной. Сейсмические волны, распространяясь в тектоносфере от источника во все стороны, на границе раздела литосфера – атмосфера передают около 1 % своей энергии акустическим волнам. Последние способны доходить до ионосферы и изменять ее параметры. Часть энергии уже в виде электромагнитных волн проникает в магнитосферу. Так осуществляется взаимодействие всех подсистем в системе ЗАИМ.

В работе [92] кратко описаны примеры экспериментов с подземными ядерными взрывами. Остановимся в качестве примера на одном из них.

Взрыв на полигоне Невада проведен 13 августа 1987 г. в 15:00 UT, энерговыделение составляло 10^{14} – 10^{15} Дж. Наиболее интересные эффекты зарегистрированы при помощи метода частичных отражений на высотах 57–105 км. Первое значительное увеличение (до 10 раз) средней интенсивности рассеянного сигнала на частоте 2,2 МГц имело место через 3–5 мин на высоте 105 км. Через 20 мин после этого возмущение зарегистрировано во всей D-области ионосферы. Наблюдалось 2 или 3 всплеска, длительность каждого из них 1–3 мин. На меньших высотах запаздывание на несколько минут больше. Очередная группа всплесков запаздывала на 65–85 мин. При этом имел место значительный рост (в 10–20 раз) мощности шума на частоте 2,2 МГц в полосе частот 50 кГц. Описанные эффекты, по-видимому, связаны со стимуляцией высыпаний энергичных (20–100 кэВ) электронов из магнитосферы.

В этом же эксперименте реакция на взрыв в E- и F-областях наблюдалась на 3-ей – 5-ой минуте. Она заключалась в появлении квазипериодических вариаций в доплеровском смещении частоты (частота 3,9 МГц, трасса – вертикальная). Величина квазипериодов ~15 и 30 мин, продолжительность реакции не менее 80 мин, амплитуда колебаний 0,1–0,2 Гц. Спустя 38 мин после взрыва пришло второе возмущение длительностью около 20 мин.

Подземные ядерные взрывы, а также мощные химические взрывы являются источниками как акустического, так и элек-

тромагнитного излучения. Они стимулируют резкое усиление (до 100 раз) мощности ОНЧ шумового излучения, процессы в магнитосфере, и, как результат, высыпание энергичных электронов [91 – 93].

Таким образом, мощные химические и подземные ядерные взрывы оказались также удобным и эффективным инструментом для исследования процессов в системе ЗАИМ. Они позволили определить типы волн, ответственных за перенос возмущений на расстояния вплоть до глобальных, а также выявить новые механизмы взаимодействия подсистем. Важно, что характер взаимодействия был нелинейным.

8 Эффекты военных действий в системе ЗАИМ

В ходе современных региональных неядерных войн воздействие на геосферы (систему ЗАИМ) многократно увеличивается. И хотя проблема является исключительно важной, ей посвящены лишь отдельные работы [94 – 96]. **Военные действия (ВД)**, происходящие в основном на поверхности земли и в приземной атмосфере, могут оказывать воздействие на литосферу, всю атмосферу и даже на геокосмос (ионосферу, магнитосферу), а также на геоэлектрическое и геомагнитное поля. Поэтому требуется комплексный анализ основных физических процессов и геоэкологических последствий в системе ЗАИМ, сопутствующих ВД.

ВД, сопровождающиеся значительным энерговыделением, в определенном смысле подобны активным экспериментам.

Современные региональные войны и конфликты, являясь неядерными, тем не менее 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 двадцать лет имел место ряд крупномасштабных региональных войн (операция “Буря в пустыне” против Ирака в 1991 г., военные действия сил НАТО про-

тив Югославии в 1999 г., антитеррористическая кампания в Афганистане в 2001 г. и операция “Шок и трепет” против Ирака в 2003 г. и др.). Перечисленные ВД сопровождалась интенсивными **ракетно-бомбовыми ударами (РБУ)** по ограниченным территориям в ограниченные промежутки времени.

Действие на подсистемы системы ЗАИМ отдельного мощного взрыва сравнительно хорошо изучено. Комплексное исследование эффектов в системе ЗАИМ, сопутствующих мощному химическому взрыву (масса около 0,2 кт), проведено в рамках уже упомянутого специального проекта “МАССА” [86, 88]. Реакция подсистем на массивные РБУ существенно отличается как от реакции на отдельный мощный взрыв, так от реакции на массивные ядерные удары в ходе ограниченной или всеобщей ядерной войны. Последствия ядерной войны детально моделировались рядом авторов (см., например, [97 – 100]). Лишь отдельные публикации посвящены эффектам в околоземной среде, последовавшим за ВД в Ираке (1991 г.) и в Югославии (1999 г.) [94, 96]. В этих работах обсуждаются эффекты модификации атмосферы на ионосферных высотах (около 300 км). В [94] 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 аномальное рассеяние солнечного излучения на частицах пыли [94].

В работе [101] разработана методика комплексного анализа физических эффектов и геоэкологических последствий в системе ЗАИМ, сопровождающих современные региональные неядерные войны и конфликты, оценены на примере ВД в Ираке физические и экологические эффекты в геосферах, которые возникли в результате полетов самолетов и крылатых ракет, а также интенсивных РБУ. Вычислены энергетические характеристики процессов, масса выброшенной в атмосферу пыли, потоки энергии АГВ и сейсмических волн, возмущения электрического поля атмосферы и

магнитного поля Земли. Обсуждены возможности проявления вторичных процессов, и оценивается их энергетика.

8.1 Общие сведения о военных действиях

Из перечисленных выше ВД наиболее масштабной была операция “Шок и трепет”. Рассмотрим ее подробнее [101, 102].

Как известно, для проведения операции 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 КР. Запас КР 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 ВД нанесено более сотни серий РБУ. В среднем в одной серии принимало участие 1 ÷ 2 стратегических бомбардировщика, до 20 самолетов ТПА и около 10 КР. Самый мощный РБУ был нанесен 21 марта 2003 г. около 18 UT. К началу суток 22 марта по целям в Ираке было выпущено около 1000 КР (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 В-2А, 115 самолетов типа В-52Н, 25 единиц типа В-1В) и около 1600 самолетов ТПА. Полагая, что самолеты В-2А, В-52Н, В-1В 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 В-1В несли КР общей численностью около 230 штук. Одна КР типа “Томагавк” имеет массу заряда 320 ÷ 450 кг. Примем, что в среднем эта масса составляет 400 кг. Тысяча КР 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 ВД в Ираке она вряд ли превысила $m_{\Sigma} = 15$ кт. Ей соответствует суммарное энерговыделение $E_{\Sigma} = \varepsilon_d m_{\Sigma}$. При удельном энерговыделении

$\varepsilon_d = 4$ МДж/кг E_Σ составило около $6 \cdot 10^{13}$ 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. США располагают также неядерной супербомбой массой 9761 кг (масса ВВ около 8172 кг). Наибольшая из известных российских бомб имеет массу около 5 т.

ВД сопровождалась полетами около 2000 самолетов (а значит инъекцией 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.

8.2 Эффекты полетов летательных аппаратов и взрывов

Как отмечалось в работе [101], большинство входных параметров не были известны точно. Из-за этого возникла некоторая неопределенность в величине изучаемых эффектов. Для уменьшения неопределенности расчеты проводились для различных значений входных параметров (числа самолетов-вылетов, числа сброшенных авиабомб, их мощности и энерговыделения и т.п.). Несмотря на приближенный характер расчетов, полученные оценки физических и экологических эффектов позволяют сделать ряд важных выводов. К ним, в первую очередь, относится триггерный характер вторичных процессов, энергия которых на $5 \div 6$ порядков превышает энерговыделение при взрывах. При выбросах мелкой пыли взрывами коэффициент усиления энергии в среднем достигает значения около $3 \cdot 10^5$.

Заметим, что при взрывах выброшены аэрозоли массой около $8 \cdot 10^7$ кг, что составило почти 0,1 % от массы аэрозолей во всей атмосфере. Масса аэрозолей над Ираком примерно удвоилась по сравнению с ее фоновым значением.

Триггерный характер воздействия. Для количественного описания триггерного эффекта использовался коэффициент

триггерности $K_{tr} = E_2/E_1$, где E_2 и E_1 – энергии вторичных и первичных процессов. Считая, что вторичные процессы вызваны частичным экранированием солнечного излучения с плотностью потока энергии Π_{s0} на площади земной поверхности S , при $\gamma > 1$ получим

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

где согласно данным [99]

$$\gamma = 1,7(\gamma_{ab} + 0,15\gamma_s),$$

$$\gamma_{ab} = \alpha_{ab} \rho_{ab} s = \alpha_{ab} m_{ab} / S \cos \chi,$$

$$\gamma_s = \alpha_s \rho_a s = \alpha_s m_a / S \cos \chi,$$

m_{ab} и m_a – массы поглощающей пыли и рассеивающих аэрозолей, ρ_{ab} и ρ_a – их объемные плотности. В среднем за сутки ΔP_s уменьшится примерно вдвое. Тогда энергия вторичных процессов

$$E_2 = \Delta P_s \Delta t_s / 2 \text{ или}$$

$$E_2 = 0,85 \Pi_{s0} S (\gamma_{ab} + 0,15\gamma_s) \Delta t_s =$$

$$= 0,85 \Pi_{s0} (0) (\alpha_{ab} m_{ab} + 0,15 \alpha_s m_a) \Delta t_s.$$

Здесь Δt_s – время существования аэрозолей.

При взрывах $m_{ab} \approx 0$, $m_a = k_a m_d$, где $k_a = k_1 k_2 k_3$, $k_1 = m_1 / m_d = 40 \div 800$ – 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 $k_a = 1 \div 20$. Поскольку $m_a = k_a m_d$, $E_1 = E_d = \varepsilon_d m_d$,

$$K_{tr} \approx 0,13 \frac{\Pi_{s0}(0) \alpha_s k_a}{\varepsilon_d} \Delta t_s.$$

При $\Pi_{s0}(0) = 630$ Вт/м², $\alpha_s = 3 \cdot 10^3$ м²/кг, $k_a = 1 \div 20$, $\Delta t_s = 10^6$ с имеем $K_{tr} \approx 6 \cdot 10^4 \div 10^6$.

Важно, что при $\gamma \ll 1$ коэффициент K_{tr} не зависит от S и растет с ростом Δt_s .

Механизмы забрасывания аэрозолей. В энергетике вторичных процессов ключевым есть вопрос: “Каким образом аэрозоли (пыль и дым) забрасываются на высоты не менее $1 \div 2$ км, где время жизни аэрозолей составляет $1 \div 10$ суток?” Существует ряд

механизмов, обеспечивающих подъем частиц на достаточно большие высоты. Рассмотрим их подробнее.

1) Интенсивные взрывы и пожары сопровождаются подъемом нагретого воздуха (термика) до высот $z_{\text{tm}} \approx 0.2 \div 4$ км.

2) Дополнительный нагрев атмосферного слоя с аэрозолями солнечным излучением приводит к его всплыванию. Вертикальные потоки воздуха способствуют подъему новых порций пыли, образованной взрывами, или дыма при пожарах. За 10 суток верхняя граница слоя z_{max} с аэрозолями может возрасти от 2 до 10 км. Покажем это. Воспользуемся соотношением из работы [97]

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

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 $\Delta\bar{\Pi}_s \approx 120$ Вт/м², $\Delta\gamma_a = 3.5$ К/км, $\bar{\rho}_0 = 1$ кг/м³, $c_p = 10^3$ Дж/(кг·К) и $\Delta t = 10^6$ с, получим $\Delta z_{\text{max}} \approx 8$ км. За световой день ($\Delta\bar{\Pi}_s = 240$ Вт/м², $\Delta t = 5 \cdot 10^4$ с) Δz_{m} увеличивается на 2,6 км.

3) Конденсация водяных паров сопровождается выделением латентного тепла и всплыванием 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:

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

где ε_i – удельная мощность турбулентности, L_0 – внешний масштаб турбулентности. Полагая $\varepsilon_i = 0,1$ м²/с³, $L_0 = 10$ м,

$\Delta t = 10$ суток, получим $\Delta z \approx 1,7$ км. В пределах термика ε_i увеличивается на порядок, это приведет к увеличению высоты аэрозолей до 2,5 км. Добавим, что средняя скорость подъема частиц примерно равна $2 \cdot 10^{-3}$ м/с. Она должна превышать скорость оседания частиц. Это условие выполняется для аэрозолей с радиусом $r \leq 10^{-6}$ м.

Таким образом, повторяющиеся РБУ и продолжительные пожары должны приводить к накоплению аэрозолей в атмосфере, которые затем вызывают энергичные вторичные процессы.

Воздействие АГВ. Движущиеся летательные аппараты и взрывы были мощными источниками акустических волн. Спектр акустических колебаний занимал весь акустический диапазон, включая инфразвук, звук и ультразвук. В зависимости от размеров генерирующего объема воздуха (пламени) или тела (самолета, КР) и скорости движения газа, очевидно, были участки спектра, в которых интенсивности излучения увеличивались. По оценкам [101, 102] такими участками были 0,1 ÷ 10 и 400 ÷ 700 Гц.

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, которые имеют место и на достаточно больших высотах (см., например, [103]), а также возмущение параметров глобальной электрической цепи (см., например, [104 – 109]). Последнее возникало в результате выброса больших масс наэлектризованной пыли и продуктов взрыва, применения в боеголовках слабо обогащенного урана. Упомянутые механизмы переноса возмущений требуют дальнейшего изучения. Сейчас можно только утверждать, что конвекция и турбулентность относятся к инерционным механизмам. Характерное время переноса ~ 10 суток, что и наблюдалось в экспериментах [94, 96]. Возмущение параметров глобальной электрической цепи следует отнести к малоинерционным. Характерное время, по-видимому, может составлять ~ $10^3 \div 10^4$ с.

Сейсмическое воздействие. Взрывы способствовали генерации сейсмических волн, суммарная энергия которых оценена в $6 \cdot 10^{11}$ Дж [101]. В средствах массовой информации широко обсуждались возможные сейсмические последствия РБУ в Ираке. Специалистами (как и неспециалистами) предсказывалось 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 $\sim 1 \div 10$ с). Для сравнения укажем, что энергии среднего и сильнейшего землетрясения составляют $10^{15} \div 10^{16}$ и $10^{18} \div 10^{19}$ Дж соответственно (см., например, [6, 102]).

Основные результаты. Таким образом, разработанная автором методика комплексного анализа физических процессов и геоэкологических последствий в ходе современных региональных войн позволяет проводить простые инженерные расчеты параметров этих процессов и последствий.

На данном историческом этапе военные действия характеризуются быстротечностью, нанесением интенсивных ракетно-бомбовых ударов на ограниченных территориях в ограниченные интервалы времени. Например, в течение ВД в Ираке суммарная масса использованных ВВ за первые две недели войны достигла 11 кт, а за время боевых действий (около трех недель) она приблизилась к 15 кт.

При проведении одной операции авиация осуществляет несколько тысяч вылетов, запускаются несколько тысяч крылатых ракет. При этом в атмосферу инжектируется несколько сот килотонн продуктов сгорания топлива.

В ходе ВД в Ираке полеты самолетов (около 1800 вылетов) и КР (1100 штук) привели к инъекции $100 \div 200$ и около 1 кт продуктов сгорания топлива соответственно.

Суммарная энергия акустических колебаний, вызванных полетами самолетов и КР, составила $2 \div 7,5$ и $0,04$ ТДж соответ-

ственно. Частотный спектр акустического излучения был достаточно широк. Движение летательных аппаратов и струй реактивных двигателей обусловили значительное усиление излучения в частотных диапазонах $3 \div 30$ и $400 \div 700$ Гц.

Проведение одной крупной военной операции сопровождается генерацией сейсмических волн с энергией порядка нескольких тераджоулей, разрушением нескольких мегатонн вещества (укрытий, построек, грунта и т. д.), электризацией пыли и продуктов взрыва, а также генерацией акустических колебаний с энергией в несколько тераджоулей и другими эффектами.

В ходе ВД в Ираке было разрушено примерно 3 Мт вещества. Масса аэрозолей при этом составила около 0,3 Мт, часть которых (75 кт), по-видимому, заброшена взрывами и конвекционными процессами на достаточно большие высоты ($1 \div 2$ км), где время жизни аэрозолей составляет $1 \div 10$ суток. 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 кВ/м, продолжительность отдельного возмущения изменялась в пределах нескольких сотен секунд. Взрывам сопутствовала генерация акустических колебаний в диапазоне частот $\sim 1 \div 10$ Гц. Их суммарная энергия составила около 3 ТДж, а средняя мощность – 6 МВт. Энергия сейсмических волн, сгенерированных взрывами, не превышала 0,6 ТДж.

Аэрозоли, образованные взрывами, приводят к эффекту частичного экранирования солнечного излучения. Энергия сопутствующих вторичных процессов не зависит от конкретного сценария ВД и превышает энергию первичного процесса (взрывов) примерно на $5 \div 6$ порядков.

Энергия сейсмических волн, сгенерированных взрывами, как правило, недостаточна для активизации естественных сейсмических процессов в литосфере, для инициирования сильных землетрясений.

8.3 Эффекты крупных пожаров

Лесные пожары. При проведении ВД в лесистой местности неизбежным является возникновение интенсивных лесных пожаров. Горение лесов, вызванное мощными бомбардировками и применением зажигательных средств, имело место, например, во время ВД во Вьетнаме в 1965 – 1971 гг. При этом армией США было использовано более 5 Мт боеприпасов.

Методика расчета физических эффектов, сопровождающих лесные пожары, практически ничем не отличается от методики расчета эффектов городских пожаров [101]. Отличаются лишь параметры пожаров. Результаты расчетов приведены в табл. 3 приложения. Принималось, что удельная масса древесины – 20 кг/м^2 , удельная теплотворная способность древесины – 10^7 Дж/кг , удельная скорость выгорания леса – $5 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{с)}$, время интенсивного горения – $4 \cdot 10^3 \text{ с}$, средняя скорость ветра – 10 м/с . В табл. 3 приложения m_1 – масса прореагировавшего вещества, m_2 – масса дыма, m_3 – масса углерода, Q – количество выделившегося тепла, P – средняя мощность процесса горения, v_c – скорость конвекции тепла, P_a – мощность акустического излучения, f_r – частота акустического излучения, вызванного обтеканием пламени ветром, f_t – частота акустического излучения, вызванного конвекцией, $\Delta B(R_0)$, ε_{\perp} – изменение поперечной энергии электронов радиационного пояса под действием возникающего в ионосфере квазистационарного электрического поля.

В таблице 3 показан набор зависимостей основных параметров лесных пожаров и сопутствующих им физических процессов от площади пожаров.

Электрические процессы. Сильные пожары сопровождаются не только выбросами дыма, сажи и других химических веществ. Как уже отмечалось, они являются источниками АГВ. Кроме того, пульсирующий огненный факел – источник шумового электромагнитного излучения. Спектр излучения – широк (от единиц Гц до сотен МГц) и неравномерный. В частности, следует ожидать усиления излучения в низко-

частотной части радиодиапазона за счет преобразования энергии атмосферного электрического поля в энергию низкочастотного электромагнитного излучения [108].

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

В результате перечисленных процессов плотность электрического тока j_a в приземной атмосфере значительно увеличивается, достигая значений $j_a \approx 3 \cdot 10^{-8} \div 3 \cdot 10^{-7} \text{ А/м}^2$. Заметим, что в невозмущенных условиях $j_0 \approx 3 \cdot 10^{-12} \text{ А/м}^2$ [110]. Рост j_a приводит к усилению электрического поля в верхней атмосфере. Можно показать (см. также [110]), что на высотах ионосферы (высоты $z \approx 100 - 300 \text{ км}$) напряженность электрического поля дается соотношением из [102, 110], где $E_c(0) \approx 150 \text{ В/м}$ – напряженность электрического поля у поверхности Земли в невозмущенных условиях, $\sigma_0 \approx 2 \cdot 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ – проводимость воздуха у поверхности Земли в невозмущенных условиях. Для указанных выше значений имеем $E_i \approx 30 \div 300 \text{ мВ/м}$, тогда как в невозмущенных условиях на высотах ионосферы средних широт $E_i = 0,3 \div 3 \text{ мВ/м}$.

Магнитные процессы. Увеличение атмосферного тока в области термика, т. е. над пожаром, вызывает вариации геомагнитного поля. Изменение индукции магнитного поля ΔB на расстоянии R от линейного тока силой I_a дается соотношением из [101, 102], где $I_a = j_a S$, $S = \pi d^2 / 4$ – площадь пожара со средним диаметром d . Тогда на расстоянии $R_0 = d / 2$ от центра пожара для оценок имеем следующее выражение:

$$\Delta B(R_0) \approx 3,5 \cdot 10^{-7} j_a \sqrt{S}.$$

Для оценки сверху примем $j_a \approx 3 \cdot 10^{-7}$ А/м². Тогда $\Delta B(R_0) \approx 0,1\sqrt{S}$, где S в м², а ΔB в пТл. Результаты оценок магнитного эффекта пожаров приведены в табл. 3 приложения.

Процессы в радиационном поясе Земли. Генерируемое в ионосфере электрическое поле, незначительно ослабляясь, по магнитным силовым линиям проникает в магнитосферу и при определенных условиях уменьшает “поперечную” энергию запасенных в геомагнитной ловушке заряженных частиц на величину

$$\varepsilon_{\perp} \approx eE_{\perp}d \approx eE_{\perp}\sqrt{S}.$$

Результаты оценок ε_{\perp} также приведены в табл. 3 приложения. Видно, что ε_{\perp} может достигать нескольких кэВ. Таких значений ε_{\perp} часто достаточно для перераспределения частиц по питч-углам и выпадания определенной их доли из радиационного пояса в верхнюю атмосферу ($z \sim 100$ км), а также для возникновения ряда вторичных процессов в ионосфере и магнитосфере. К ним, в частности, относятся следующие. Высыпание энергичных частиц способствует увеличению проводимости плазмы на высотах динамо-области ($z \approx 100 - 130$ км), что обуславливает, с одной стороны, изменение электрического поля поляризации, которое, проникая в магнитосферу, взаимодействует с энергичными частицами радиационного пояса, стимулируя их дальнейшее высыпание. Возникает система с положительной обратной связью, т. е. своеобразный генератор с самовозбуждением.

С другой стороны, возникшие вариации σ_i на высотах динамо-области вызывают генерацию геомагнитных возмущений, которые распространяются в магнитосфере. Последние также могут оказывать влияние на энергичные частицы в радиационном поясе Земли. Конечно, описанные эффекты становятся ощутимыми лишь при крупномасштабных пожарах (табл. 3 приложения). Такие пожары в течение ВД в Ираке практически не наблюдались. Зато они имели место во время Второй мировой войны, например, при горении городов Гамбург и Дрезден [111]. Площадь очага пожара при этом приближалась к $10 \div 20$ км²

[108]. Возникший огненный смерч достигал высот стратосферы. Он должен был привести к существенному увеличению j_a и срабатыванию всей описанной выше цепочки явлений.

8.4 Экологические эффекты

Экологические последствия ВД связаны, прежде всего, с выбросами аэрозолей (пыли) при взрывах, дыма и чистого углерода при городских и лесных пожарах, а также горениях нефтяных скважин и нефтехранилищ. Эти и другие факторы рассмотрим подробнее на примере операции “Шок и трепет” [101].

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 $\alpha_s \approx 3,5 \cdot 10^3$ м²/кг, $\alpha_{ab} \approx 5 \cdot 10^3$ м²/кг [98]. Из работ [99, 112] 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 $\Pi_{s0}(0) = 630$ Вт/м² 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 2 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 $\Delta t \approx 20$ суток $\Delta E_s \approx 10^{21}$ 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 городских пожарах привели к еще меньшему (на $1,5 \div 2$ порядка) эффекту, чем выбросы при горении нефтехранилищ (см. табл. 4 приложение).

Выбросы химических веществ. Горение нефти и органических веществ при городских пожарах сопровождается инъекцией в атмосферу не только дыма, двуокиси и окиси углерода, сажи (углерода), но и таких химических веществ как углеводороды (CH_4 , C_2H_6 и т.д.), оксиды серы и азота, а также кислоты (HCl , H_2SO_4 , HNO_3) и др. Их масса в основном зависит от вида и массы прореагировавшего горючего материала. В ходе ВД в Ираке таким материалом преимущественно была нефть. Это позволило оценить массы выброшенных химических веществ. Результаты их оценок приведены в таблице 5 приложения. Из нее видно, что ВД привели лишь к незначительному (около 1 %) дополнительному запылению атмосферы. В то же время масса выброшенного дыма за $10 \div 20$ 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 CO_2 составила 50 т/с (в мирных условиях эта величина составляет около 500 т/с для земного шара в целом и 0,5 т/с для Ирака). 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 (C_3H_8 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, по-

ступающих в земную атмосферу в результате хозяйственной деятельности человека.

Другие экологические эффекты. К определенным экологическим последствиям привела инъекция тепловой энергии в результате сгорания больших масс горючих веществ. Существенным является возмущение параметров глобальной электрической цепи в результате выброса наэлектризованной пыли при взрывах и значительных масс дыма при пожарах, а также 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 [103, 105 – 109, 112].

Вторичные (триггерные) процессы. Считается [101], что вторичные процессы на земле и в атмосфере вызваны экранированием солнечного излучения слоем дыма и сажи в течение времени Δt_s , равном времени существования аэрозолей.

При пожарах коэффициент поглощения $\alpha_{ab} \approx 2,86\alpha_s s_c$, где α_s – коэффициент экстинкции, s_c – массовая доля углерода [98, 100]. При $s_c \approx 0,5$ величина $\alpha_{ab} \approx 5 \cdot 10^3$ м²/кг. Поскольку $m_{ab} = k_{ab} m_1$, $m_a = k_a m_1$, $E_1 = \varepsilon_T m_1$, коэффициент триггерности [112]

$$K_{tr} = 0,85 \frac{\Pi_{s_0}(0)(\alpha_{ab} k_{ab} + 0,15\alpha_s k_a)}{\varepsilon_T} \Delta t_s. \quad (5)$$

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 $k_{ab} = 0,05$, $k_a = 0,1$, $\varepsilon_T = 4 \cdot 10^7$ Дж/кг, $\Delta t_s = 10^6$ с получаем $K_{tr} \approx 4 \cdot 10^3$. При лесных пожарах $\varepsilon_T \approx 10^7$ Дж/кг. Тогда при том же Δt_s имеем $K_{tr} \approx 1,6 \cdot 10^4$.

Из формулы (5) видно, что K_{tr} пропорционален Δt_s и не зависит от S (при $\gamma \ll 1$). Здесь $\gamma \approx 1,7(\gamma_{ab} + 0,15\gamma_s)$, $\gamma_{ab} = \alpha_{ab}\rho_{ab}s$, $\gamma_s = \alpha_s\rho_a s$ – оптические толщины поглощения и рассеяния, ρ_a – объемная плотность аэрозолей слое толщиной s .

При пожарах в Ираке (в основном при горении нефтескважин) суммарное энерговыделение достигло примерно $2 \cdot 10^{18}$ Дж, а средняя мощность – почти 10^{12} Вт. Для сравнения укажем, что человечество в год потребляет энергию величиной около $6 \cdot 10^{20}$ Дж при мощности $2 \cdot 10^{13}$ Вт. 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, кислот (см. табл.5 приложения). Естественно, что эти выбросы усугубили экологическую обстановку как в Ираке, так и в прилегающих к нему государствах. Добавим, что в ходе ВД ветер над Ираком был направлен преимущественно с юга на север.

Энергия и мощность вторичных процессов приблизились к 10^{22} Дж и $7 \cdot 10^{15}$ Вт. В то же время мощность динамических процессов (ветров) в атмосфере над Ираком при средней скорости ветра 10 м/с составляет около 10^{13} Вт, а их энергия за время ведения ВД (20 суток) – около $2 \cdot 10^{19}$ Дж. Частичное экранирование слоем дыма и сажи солнечного излучения привело к тому, что земная поверхность недополучила солнечной энергии около 10^{22} Дж при средней мощности около $7 \cdot 10^{15}$ Вт. Все это означает, что ВД 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 нефтехранилищах был в $10^2 \div 10^3$ раз меньше. Еще к меньшему (в 100 раз) эффекту привели городские пожары.

Несмотря на значительную энергетику вторичных процессов, они не имели катастрофических последствий ни для атмосферы, ни для земной поверхности из-за их

относительно небольшой (~10 суток) продолжительности. Кроме того, относительное изменение мощности солнечного излучения у подстилающей поверхности, равное γ , было заведомо существенно меньше единицы. Поэтому вдали от мест взрывов и пожаров запыление и задымление атмосферы визуально практически не наблюдалось. Описываемые вторичные процессы по своей интенсивности и, главное, по своей продолжительности существенно отличались от процессов, приводящих к “ядерной ночи”, “ядерной зиме”, “вулканической зиме” или к “астероидной зиме” [97 – 99]. Первопричина всех этих процессов общая – запыление и задымление атмосферы. Изучаемые здесь процессы скорее напоминают экранирование солнечного излучения облачной структурой.

Суммарная энергия АГВ, сгенерированных в ходе операции “Страх и трепет”, приблизилась к 5 ПДж, т.е. $5 \cdot 10^{15}$ Дж, при средней мощности около 2 ГВт, в то время как над территорией Ирака фоновое значение мощности АГВ примерно равно $0,1 \div 0,3$ ГВт. Видно, что ВД привели к увеличению мощности АГВ на порядок, что в свою очередь вызвало значительную перестройку режима взаимодействия между нижней и верхней атмосферами.

Результаты выполненных в [101] исследований показали, что воздействие на атмосферу в ходе современных региональных неядерных войн может быть значительным и должно приниматься во внимание. Наиболее существенные по энергетике экологические последствия связаны с выбросами мелкой пыли, дыма и сажи, которые частично экранируют солнечное излучение. Энергия вторичных процессов на $3 \div 6$ порядков превосходит энергию первичного источника. Несмотря на это, вторичные процессы не приводят к катастрофическим последствиям, если ВД не принимают затяжного характера.

Как показали эксперименты [94], возникшие в приземной среде возмущения распространяются на большие (~ 1000 км) расстояния и охватывают не только нижнюю атмосферу, но и среднюю и верхнюю атмосферу, а также ионосферу с магнитосферой, т.е. всю систему ЗАИМ.

Таким образом, на примере ВД в Ираке показано, что 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 частичным 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.

Горение нефтяных скважин – самый интенсивный источник возмущения параметров околоземной среды и процессов в ней. Мощность, выделяемая при горении скважины в ходе ВД в Ираке, 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. Массы этих выбросов сравнялись или даже превосходили (для сажи) массы дыма и сажи во всей атмосфере. Это привело к эффекту частичного экранирования солнечного излучения, из-за которого земная поверхность недополучила около 10^{22} Дж энергии солнечного излучения. Мощность этого вторичного (триггерного) процесса составила около 7 ПВт. Горение нефтескважин сопровождалось генерацией АГВ с энергией около 4,5 ПДж и средней мощностью около 2 ГВт.

При пожарах на нефтехранилищах Ирака 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.

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.

В ходе ВД при лесных пожарах может сгореть до нескольких Мт древесины. В атмосферу при этом будет выброшено сотни кт дыма и сажи. Суммарное энерговыделение от лесных пожаров может достичь десятков ПДж при средней мощности в несколько ТВт.

Кроме нарушения теплового и динамического режимов в системе подстилающая поверхность – атмосфера, к негативным экологическим последствиям приводят выбросы углеродов (~10 ÷ 100 % от фонового значения во всей атмосфере) и кислот HCl, H₂SO₄ и HNO₃ (~10 % от фонового значения во всей атмосфере). Такие выбросы следует признать если не катастрофическими, то, по крайней мере, недопустимыми.

Интенсивные пожары, выбросы наэлектризованной пыли и аэрозолей, инжекция радиоактивного вещества в результате использования слабо обогащенного урана, изменяя проводимость достаточно больших объемов атмосферного газа, должны приводить к существенному возмущению электрических параметров атмосферы над регионом ВД и глобальной электрической цепи в целом.

Значительная энергетика АГВ обуславливает нарушение режима взаимодействия нижней и верхней атмосфер, а также возникновение вторичных процессов. Имеют место и другие каналы воздействия процессов в приземной атмосфере на ионосферу и магнитосферу, а значит и всю систему ЗАИМ. К счастью, все эти вторичные процессы не являются катастрофическими.

9 Эффекты аварий и катастроф в системе ЗАИМ

В работах автора [112 – 116] описаны геофизические эффекты и экологические последствия массовых взрывов и пожаров на военных складах в г. Артемовск в октябре 2003 г. под г. Мелитополь в мае 2004 г. и г. Лозовая в августе 2008 г. (Украина). Аналогичные происшествия имели место на Камчатке, на военных складах Тихоокеанского флота России в октябре 2005 г., в

Башкирии и Удмуртии в мае – июне 2011 г. Показано, что такие катастрофы относятся к одним из наиболее значительных в мирное время. В определенном смысле они также представляют собой разновидность активных экспериментов.

Масса прореагировавших в течение катастрофы в г. Артемовск боеприпасов составляла около 1,7 кт (общая масса боеприпасов была около 3,2 кт). Запасы боеприпасов на военной базе под г. Мелитополь перед началом катастрофы приближались к 100 кт. Прореагировало около 18 кт. Следовательно, величина геофизических эффектов и геоэкологических последствий для второй катастрофы была значительно больше. В результате взрывов на военных складах в г. Лозовая прореагировало около 85 кт из хранившихся 95 кт боеприпасов.

Каждая катастрофа имеет свои индивидуальные особенности (см., например, описание катастроф в [111]), требует тщательного изучения и разработки мер по их предотвращению.

Для примера приведем основные результаты комплексного анализа геофизических эффектов и геоэкологических последствий, вызванных взрывами боеприпасов и пожарами на военных складах под г. Мелитополь [115, 116]. Близкими были масштабы катастроф в г. Лозовая в 2008 г., а также в Башкирии и Удмуртии в 2011 г.

9.1 Общие сведения о масштабах катастрофы под г. Мелитополь

275-я база артиллерийских боеприпасов (военная часть А 2985) располагалась в 4 км от с. Новобогдановка Мелитопольского района Запорожской области [115, 116]. Площадь базы составляла 36 га. На складах хранились 91631 т боеприпасов (100-, 122- и 150-миллиметровые снаряды, а также снаряды для реактивных систем залпового огня (РСЗО) типа “Град”, “Ураган” и “Смерч”). Дальность полета снарядов РСЗО в штатном режиме составляет 20 – 35 км, в нештатном – достигает 70 – 75 км.

Катастрофа началась с пожара на одном из складов 6 мая 2004 г. Первый боеприпас взорвался в 09:15 UT. Через 1 – 2 ч частота взрывов ν достигла значений 1200 – 1800 ч⁻¹, к вечеру частота уменьшилась

до 700 – 900 ч⁻¹. Взрывы сопровождались очень сильным пожаром, высота пламени и дыма достигала 300 м. В ночь с 6 на 7 мая прошел ливень, локализовавший пожар. Высота пламени и дыма уменьшилась до 60 м. Утром 7 мая $\nu \approx 60 - 120$ ч⁻¹, а к обеду частота взрывов уменьшилась примерно до 30 ч⁻¹. В ночь с 7 на 8 мая прошел еще один дождь. Интенсивность пожаров и взрывов при этом снижались. Взрывы с постепенно уменьшающейся частотой наблюдались до 15 мая.

По оценкам автора за первые сутки произошло около 10 тыс. взрывов, а за остальные 8 суток – около 2 тыс. Наиболее интенсивные взрывы наблюдались после обеда 6 мая. За время около 1 ч имело место 2 тыс. взрывов.

Осколки от осколочно-фугасных артиллерийских снарядов разлетались на десятки километров. Максимальная расчетная дальность полета снарядов РСЗО приближалась к 70 – 75 км. В зоне радиусом 3 – 5 км плотность разбросанных боеприпасов и крупных осколков составляла 100 – 10 км⁻² соответственно. В зоне поражения осколками артснарядов оказались более 250 населенных пунктов, в которых проживало 23900 жителей. Районный центр, г. Мелитополь, находился в 25 км от эпицентра катастрофы. Запорожская АЭС располагалась в 70 км от него.

Положение усугублялось тем, что в зоне досягаемости осколков, а тем более реактивных снарядов, оказались газопровод, нефтебаза и цистерны с аммиачной селитрой. Их разрушение могло значительно увеличить масштабы катастрофы.

В воздух взлетело около 20% (18 кт) хранившихся боеприпасов.

Энергетика взрывов. Общая масса боеприпасов составляла около 91,6 кт. Причем, масса ВВ была близка к 50%, или 45 кт. Считаем, что удельное энерговыделение ε_d ВВ такое же как и тротила (ТНТ). Для последнего $\varepsilon_d = 4,2$ МДж/кг [115 – 116]. Массе в 45 кт соответствует суммарное энерговыделение $E_{\Sigma} \approx 1,9 \cdot 10^{14}$ Дж. Для сравнения укажем, что в августе 1945 г. на Хиросиму была сброшена авиабомба с энер-

говывделением эквивалентным примерно 12,5 кт ТНТ ($5,3 \cdot 10^{13}$ Дж) [111].

9.2 Эффекты взрывов и пожаров

Выполненные в работах [115, 116] оценки справедливы, как это бывает в случае подобных техногенных катастроф, по порядку величины, так как многие входные параметры не были известны точно. Для уменьшения влияния неизбежной при этом неопределенности расчеты выполнены для диапазона значений ряда входных параметров.

Акустические эффекты. В естественных условиях мощность акустического излучения в г. Мелитополь составляет в среднем десятки киловатт. Взрывы и пожары привели к генерации интенсивного акустического излучения. В первые часы катастрофы их мощности составляли 0,2 – 1,4 ГВт и 15 МВт соответственно, т. е. возросли в десятки – сотни тысяч раз (в результате разразившейся канонады) или в сотни раз (за счет интенсивных пожаров).

Акустические эффекты могли иметь не только локальные последствия. Дело в том, что ВГВ, распространяясь вверх, диссипируют на высотах 100 – 250 км, изменяя динамический режим средней и верхней атмосфер.

Другие механизмы воздействия на верхнюю атмосферу и геокосмос кратко обсуждаются в работе автора [101].

Электромагнитные эффекты. Эти процессы были относительно слабыми и не могли вызвать серьезные изменения в атмосфере и геофизических полях вдали от места катастрофы.

Сейсмический эффект был сравнительно малым из-за растянутости взрывов во времени. В то же время суммарная энергия сейсмических волн имела внушительную величину – около 1 – 2 ГДж.

Триггерный эффект. Оказалось, что энергия вторичных процессов превышает на 3 – 4 порядка энергию взрывов и пожаров. К счастью, он не привел (в отличие от извержений мощных вулканов) к катастрофическим последствиям ни для поверхности планеты, ни для ее атмосферы из-за сравнительно небольшой (1 – 10 суток) продолжительности воздействия.

Эффекты выбросов химических веществ. Массы выброшенных пылевых аэрозолей и дыма примерно на два порядка превысили их массы в атмосфере над Мелитополем (табл. 6 приложение). Масса инжескированной двуокиси углерода составила около 20 % от ее фонового значения в атмосфере над городом. При площади региона катастрофы 30 км² удельная скорость поступления СО₂ в 12 тыс. раз превысила ее фоновое значение, равное 10⁻⁹ кг/(м²с) [101, 114]. Масса поступившей окиси углерода в 170 раз превысила массу этого газа над Мелитополем (площадь в 30 км²). Особенно были значительными выбросы углерода (сажи): его масса примерно в 17 тыс. раз больше массы этого вещества в атмосфере над городом.

Эффекты массовости взрывов. Специфика массовых химических взрывов рассматривалась выше, а также в работе автора [114]. Важно, что эффекты от отдельных взрывов не просто накладывались. В ряде случаев можно было ожидать параметрического усиления процессов, например, генерации акустического и электромагнитного излучений на частотах, близких к частоте повторения взрывов.

Нельзя не отметить и синергетическое взаимодействие взрывов и пожаров. В частности, взрывы приводили к перемещиванию воздуха, а значит к интенсификации процесса горения. Сильные пожары, создавая мощную вертикальную тягу (скорость потоков воздуха достигала 10 м/с), способствовали забрасыванию аэрозолей (и что важно – заряженных) на большие высоты.

Основные результаты. Изучение физических эффектов и экологических последствий массовых химических взрывов на военных складах – важная научная, морально-этическая, социальная, экономическая и военно-политическая задача.

В течение катастрофы 6 – 16 мая 2004 г. на складах вблизи г. Мелитополь масса прореагировавших боеприпасов составила около 18 кт, а энергывделение – около 20 ТДж.

При взрывах разрушено и перемещено около 360 кт вещества. При этом образовано десятки килотонн пыли, в том числе и порядка 0,1 – 1 кт аэрозолей (часто заря-

женных), заброшенных на достаточно большие высоты, где время их оседания составляет 1 – 10 суток. Масса разлетевшихся в зоне радиусом до 10 км останков боеприпасов превышала 10 кт.

Взрывы привели к генерации акустического излучения с суммарной энергией около 14 ТДж, его мощность была близка к 0,2 – 1,4 ГВт. В спектре акустического излучения преобладали составляющие с частотами порядка 1 – 10 Гц.

Суммарная энергия сейсмических волн, сгенерированных взрывами, не превышала 1 – 2 ГДж. Их средняя мощность составляла десятки – сотни киловатт.

Вблизи очага катастрофы напряженность атмосферного электрического поля должна была на 3 – 4 порядка превышать ее фоновое значение и составлять 0,1 – 1 МВ/м.

Вариации индукции геомагнитного поля должны были достигать значений в несколько десятков пикотесла, что заметно превышает уровень фоновых флуктуаций.

Взрывы боеприпасов сопровождались генерацией электромагнитного излучения в широком диапазоне частот.

Взрывы на складах привели к крупномасштабным интенсивным пожарам. Их горизонтальный и вертикальный размеры достигали 100 и 300 м соответственно. Массы сгоревших материалов, дыма и сажи составили около 10 тыс., 1 тыс. и 500 т соответственно. Энерговыделение при пожарах и их мощность достигали примерно 100 ТДж и 5 ГВт.

Пожары вызвали генерацию АГВ с мощностью 15 МВт и энергией 300 ГДж. Следовало ожидать усиления излучения вблизи частот 1,9 и 3 мГц, а также в диапазонах частот 0,02–0,2 и 0,01–1 Гц.

Массовые взрывы и пожары нарушили тепловой и динамический режим в системе подстилающая поверхность–атмосфера. Генерация, распространение и диссипация АГВ активизировали взаимодействие нижней и верхней атмосфер. Нельзя исключать и другие каналы воздействия процессов в приземной атмосфере на ионосферу и магнитосферу, т. е. на всю систему ЗАИМ.

Важнейший результат исследований заключается в подтверждении установленного ранее автором факта возможности стимуляции вторичных, значительно более энергичных, процессов. Они связаны с рассеянием аэрозолями и поглощением сажей солнечного излучения продуктами взрывов и горения, выброшенными в стратосферу, а значит частичным экранированием земной поверхности. Важно, что коэффициент триггерности в случае описываемой катастрофы составлял $10^3 - 10^4$. В результате экранирования солнечного излучения земная поверхность недополучила за 10 суток около $2 \cdot 10^{18}$ Дж энергии. Примерно такая же энергия выделилась в атмосфере. К счастью, такие нарушения энергетического баланса не имеют катастрофического значения ни для земной поверхности, ни для атмосферы.

9.3 Эффекты катастроф на газотранспортной системе

В работах [102, 117] выполнен комплексный анализ геофизических эффектов и геоэкологических последствий техногенной катастрофы на магистральном газопроводе Уренгой – Помары – Ужгород, имевшей место 6 декабря 2007 г.

Взрыв газа на магистральном газопроводе Уренгой – Помары – Ужгород на участке между компрессорными станциями № 36 и № 37 (на расстоянии около 2 км от села Тягун Ильинецкого района Винницкой области) произошел 6 декабря 2007 г. по разным данным в интервале времени от 19:10 до 19:20 киевского времени (UT + 2 часа) [117]. Скорее всего, причиной взрыва послужила случайная искра.

Взрыв сопровождался локальным землетрясением. В результате взрыва образовалась воронка диаметром $D \approx 30$ м, глубиной $h \approx 5$ м. Взрыв разрушил около 30 метров трубы газопровода, начальное давление газа в котором составляло 75 атм. Вытекание газа привело к крупномасштабному пожару. Диаметр огненного факела достигал 100 м, высота – 300–400 м. Пожар с постепенно уменьшающейся интенсивностью продолжался до 21:00 (18:00 UT), т. е. в течение 100–110 мин.

Перечислим основные результаты исследований [117].

Разработан комплексный подход к анализу физических эффектов и возможных экологических последствий, позволяющий оценить масштаб техногенной катастрофы на газопроводах Украины.

Оцененное двумя способами – по массе прореагировавшего вещества и степени разрушений – энерговыделение при взрыве газа оказалось близким к 14 ГДж.

Наиболее сильные эффекты имели место в первые несколько минут после взрыва, пока давление вытекающего газа составляло десятки атмосфер.

Масса сгоревшего газа примерно равнялась 2.6 кг, энерговыделение – 130 ТДж, максимальная мощность горения – 1.2 ТВт. Энергии воздушной ударной волны и сейсмической волны были близки к 1 ГДж и 1 МДж соответственно. Диаметр зоны, охваченной пламенем, достигал 100 м, высота – 400 м, высота термика – единиц километров. В огненном смерче вертикальная скорость движения нагретого газа уменьшалась с увеличением высоты от нескольких сотен до нескольких десятков метров в секунду.

Оценены размеры и площади зон риска – зоны полного разрушения экосистемы, зон полного и частичного разрушения построек и небезопасной зоны при обсуждаемой техногенной катастрофе. Их радиусы равнялись 16, 44, 615 и 6400 м, площади – $7.8 \cdot 10^2$, $6 \cdot 10^3$, $1.2 \cdot 10^6$ и $1.3 \cdot 10^8$ м² соответственно.

Радиус зоны вторичных пожаров достигал 0.6 км, а площадь – примерно 1 км².

Установлено, что массы выбросов дыма, сажи, угарного газа и других вредных веществ в течение пожара были относительно невелики.

Показано, что энергия вторичных процессов, связанных с ослаблением интенсивности солнечной радиации заброшенными в атмосферу аэрозолями, в сотни тысяч раз больше энергии взрыва и всего в 5 раз – энергии, выделившейся при горении газа.

Суммарная площадь соответствующих зон риска, расположенных у газопроводов составляет около 1.2, 3.2, 48 и 230

тыс. км², или 0.2, 0.5, 8 и 38 % территории Украины.

Риску оказаться в зоне первичных и вторичных пожаров, прилегающих к газопроводам, подвергаются соответственно около 3.6 и 43 тыс. км² (или 0.6 и 7 % территории Украины).

Дальнейшее содержание в неудовлетворительном состоянии стареющих газокommunikаций представляет серьезную угрозу для близлежащих населенных пунктов и страны в целом.

9.4 Эффекты катастроф на газовых месторождениях

Вблизи с. Крестище в Харьковской области в 1970 г. было открыто крупнейшее газоконденсатное месторождение. Объем газа оценивался в 300 млрд м³, его давление превышало 400 атмосфер, газ залегал на глубине около 3 км. К моменту аварии работало 17 скважин, которые выдавали около 10 млн м³ газа в сутки.

Авария на 35-й скважине на глубине около 20 м произошла в октябре 1971 г. [118]. Вырвавшиеся газы снесли буровую вышку, образовали кратер диаметром до 10 м и с оглушительным ревом стали заполнять окрестности. Уже в начале аварии погибло два геолога. Вместе с природным газом наружу выбрасывался и конденсат. Во избежание негативных экологических последствий примерно через сутки фонтан подождли. Высота подожденного факела достигала сотни метров. Пламя неистово гудело. (Автор неоднократно посещал место аварии.) Стихия оказалась необузданной. Пожар пытались потушить при помощи многотонных железобетонных блоков, но струя их легко сдувала. Не помогло и „пломбирование” наклонных стволов, т. е. закачивание в них специальных растворов с целью перекрытия основного ствола. Пламя бушевало уже много месяцев. Ситуация сложилась безвыходная.

Силами военных специалистов была подготовлена и осуществлена единственная в своем роде (по крайней мере, на территории Украины да и Европы) операция „Факел”. Ее подготовка заняла около 6 месяцев. В наклонный ствол глубиной около сотни метров был опущен и замурован

ядерный заряд с тротиловым эквивалентом – 3.8 кт [118]. Взрыв вызвал локальное землетрясение с магнитудой около 4. В результате смещения грунта пожар удалось погасить, но ненадолго – всего на 20 секунд. Спустя это время выбросы возобновились, причем высота выброса первые десятки секунд была значительно больше, чем до взрыва. По словам очевидцев, высота газо-пылевой струи составляла около 1 км. Важно, что вместе с газоконденсатом были выброшены в атмосферу продукты ядерного взрыва.

Масштабы аварии были впечатляющими. Горение продолжалось около двух лет (точнее, 21 месяц). За это время сгорело около 130 Мт ценного сырья. При этом выделилась энергия, которую потребляет все человечество примерно за четверо суток. Мощность горения была около 115 ГВт, что в несколько раз превышает мощность, производимую всеми электростанциями Украины. В атмосферу было выброшено более 1 Гт дыма и сажи, что сопоставимо с содержанием этих веществ в атмосфере Земли. К счастью, и дым, и сажа вымываются осадками.

Значительными были объемы образовавшихся в атмосфере кислот.

Последствия промышленного подземного ядерного взрыва были неприемлемыми. Радиационный фон в окрестности месторождения газового конденсата значительно увеличился. От взрыва серьезно пострадали постройки, находившегося вблизи (на расстоянии 400–500 м) с. Першотравневе, погибли скот, птица и пчелы.

10 Волновые процессы в системе ЗАИМ

Исследование волновых возмущений (ВВ) относится к одной из основных проблем физики атмосферы и геокосмоса (см., например, [82, 119 – 121]).

ВВ занимают видное место в системном подходе к исследованию образования Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера. Дело в том, что ВВ являются не только переносчиком энергии и импульса в системе ЗАИМ, они также служат индикатором состояния этой системы в целом и

вариаций космической (да и обычной) погоды в частности.

При изучении ВВ обычно решаются следующие задачи: 1) Уточняется роль и проявления различных источников ВВ; 2) Определяется величина переносимой ВВ энергии и импульса; 3) Выявляется спектральный состав ВВ и его изменения при распространении ВВ; 4) Уточняется роль ВВ во взаимодействии подсистем в системе ЗАИМ [50, 102]; 5) По характеристикам ВВ изучаются физические процессы в околоземной среде. ВВ могут быть инструментом дистанционной диагностики параметров атмосферы и геокосмоса, поскольку дальность распространения ВВ достигает $1 \div 10$ тысяч километров.

Волновое поле вариаций электронной концентрации $\Delta N(t, \mathbf{r})$ представляет собой результат интерференции большого числа волн с различными периодами (частотами), длинами волн, амплитудами, скоростями распространения, направлениями распространения и т.д. Более того, на квазирегулярные вариации ΔN накладываются случайные флуктуации. Часто, однако, в этом многообразии начинают преобладать ВВ с определенными периодами и амплитудами. Обычно задачей исследователя является выделение именно этих ВВ, так как они обладают наибольшей энергией и более всего влияют на процессы в среде и характеристики распространяющихся в ней радиоволн.

10.1 Методы обнаружения квазипериодических процессов и волновых возмущений

Для наблюдения квазипериодических процессов (волновых возмущений) нами использовались радар частичных отражений (высота $z \approx 70 - 100$ км), доплеровский радар декаметрового диапазона ($z \approx 100 - 400$ км), радар некогерентного рассеяния (высота 100 – 1000 км), сигналы навигационных спутников (когерентные частоты 150/400 МГц), а также сигналы навигационных и вещательных радиостанций (частоты от 10 кГц до 30 МГц). ВВ индукции геомагнитного поля (геомагнитные пульсации в диапазоне частот 0,001 – 1 Гц) регистрировались при помощи высокочув-

ствительного магнитометра-флюксметра [122, 123].

Для выявления квазипериодических процессов использовалось как традиционное преобразование Фурье, так и его модификация, названная адаптивным преобразованием Фурье. В этом случае адаптация заключается в "приспособлении" времени интервала обработки к величине оцениваемого периода Фурье-компоненты сигнала [124].

В последнее время для анализа различных процессов успешно применяется вейвлет-преобразование, которое обладает одновременно хорошим частотным и временным разрешениями (см., например, [125, 126]). К задачам физики космоса и космической радиофизики вейвлет-анализ нашел применение в работах [127 – 136]. Наряду с вейвлет-спектрами имеет смысл анализировать и другие, производные, параметры вейвлет-преобразования (скалограмма, скелетон и др.) [124, 133]. Оказалось, что результаты Фурье-анализа и вейвлет-анализа не исключают, а хорошо дополняют друг друга [124, 133 – 136]. Разработан удобный формат представления данных, состоящий из анализируемого временного ряда, результатов спектрального и вейвлет-преобразования (спектров), скалограмм, скелетонов и т. п. [124, 133 – 136].

Опишем далее результаты наблюдения методом некогерентного рассеяния ВВ в ионосфере, вызванных нестационарными процессами в системе ЗАИМ.

10.2 Результаты экспериментов

Обсудим вначале суточные вариации параметров ВВ [134 – 160]. Прежде всего отметим, что ВВ наблюдались практически в любое время суток и на всех высотах (~100 ÷ 500 км, а в отдельных экспериментах вплоть до 1000 км). Их амплитуда, как правило, качественно отслеживала суточный ход электронной концентрации $N(t)$ в ионосфере, включая локальные максимумы в зависимости $N(t)$. В дневное время амплитуда ВВ была в 2 ÷ 5 раз больше, чем в ночное время. Значение N при этом изменялось примерно на порядок. Поэтому от-

носительная амплитуда ВВ $\delta_N = \Delta N / N$ в ночное время была обычно в 2 ÷ 5 раз больше, чем в дневное. Последнее имело место лишь в нижней части F-области ионосферы, т. е. на высотах $z < 300$ км. Здесь в дневное время $\delta_N \leq 20$ %, а в ночное время δ_N достигали многих десятков процентов. Как правило, чем меньше было значение N , тем больше было значение δ_N . К сожалению, при малых значениях N имели место и малые значения отношения сигнал/шум ($q \leq 0,1$). Поэтому с ростом δ_N возрастала и ее неопределенность. Например, 22 марта 2003 г. на высоте 152 км $\delta_N \approx 70 \pm 30$ %, а на высоте 290 км она составляла 25 ± 6 %.

В верхней части F-области ионосферы (высоты от 300 ÷ 400 до 500 ÷ 550 км) суточные вариации $\delta_N(t)$ были выражены слабо.

Интересной является высотная зависимость амплитуды ВВ в дневное время. На высотах от 100 ÷ 125 км до высот 200 ÷ 300 км она увеличивалась в 5 ÷ 20 раз. При $z \approx 200 \div 300$ км обычно наблюдались максимальные значения амплитуд ВВ. На больших высотах прослеживалось постепенное их уменьшение. При $z \approx 500$ км амплитуды ВВ были на порядок меньше, чем при $z \approx 200 \div 300$ км. При этом характерный масштаб убывания амплитуд (в e раз) составлял около 100 км.

Если бы высотный ход амплитуд ВВ в дневное время определялся только профилем $N(z)$, для которого максимум отмечается на высоте около 300 км, то и максимум амплитуд, по-видимому, наблюдался бы примерно на 300 км. В то же время последний проявляется на высотах 200 ÷ 300 км. Скорее всего, высотная зависимость амплитуд ВВ определялась их волноводным характером распространения, а также физическими процессами, ответственными за формирование и диссипацию ΔN (см. об этом ниже). Эффективная толщина волновода и его высота составляли около 150 ÷ 200 и 180 ÷ 200 км соответственно.

Рассмотрим сезонную зависимость. ВВ наблюдались во все сезоны года. В зависимости от сезона характеристики ВВ изменялись лишь количественно. Относи-

тельно небольшой объем исходных данных не позволил установить сезонный ход характеристик ВВ. Можно утверждать, что высота волновода и его эффективная толщина не сильно изменялись в зависимости от времени года.

Во все сезоны амплитуда ВВ в дневное время была больше в $2 \div 5$ раз, чем в ночное время. Относительная амплитуда, во все сезоны ночью была больше, чем днем.

Нижняя граница, начиная с которой суточные зависимости $\delta_N(t)$ были выражены слабо, изменялась существенно – примерно от 300 до 400 км.

Влиянию *солнечного терминатора (СТ)* на параметры ионосферы посвящено большое количество работ (см., например, [2 – 5, 56, 144, 147 – 148, 161]). Тем не менее, его роль изучена недостаточно, особенно в экспериментальном плане. В наших наблюдениях отмечалось, что после прохождения СТ изменялись амплитуды ВВ и их спектральный состав. Поскольку горизонтальная скорость ВВ, связанных с терминатором, обычно составляет $v = 100 \div 300$ м/с, а его скорость движения в средних широтах – около 350 м/с, ВВ могут существенно (на несколько часов) отставать от терминатора. При декременте затухания ВВ $3 \cdot 10^{-4} \div 10^{-3} \text{ км}^{-1}$ и $v = 200$ м/с продолжительность их наблюдения должна составлять $1,5 \div 5$ часов. Это означает, что утренний и вечерний терминаторы вместе способны поддерживать существование ВВ в течение времени от 3 до 10 часов. Эти оценки не противоречат нашим наблюдениям, а также результатам других исследователей.

Кратко рассмотрим влияние затмений Солнца. ЗС напоминает наступление кратковременной (около $2 \div 3$ ч) ночи. Поэтому затмения, как и прохождение солнечного терминатора, сопровождаются изменением характера ВВ, при этом варьируются амплитуды и спектральный состав ВВ. Продолжительность реакции на ЗС достигала многих часов.

Остановимся на особенностях ВВ, сопровождавших ионосферную бурю на примере двухфазной ионосферной бури 20

\div 21 марта 2003 г. В течение положительной фазы, днем 20 марта, амплитуда ВВ была существенно больше, чем в последующие три дня. В период отрицательной фазы, т. е. 21 марта, амплитуды были заметно ниже, чем 22 и, тем более, 20 марта. Можно утверждать, что амплитуды ΔN качественно отслеживали изменения N . Как известно, положительная и отрицательная бури сопровождаются соответственно ростом и падением N по сравнению с фоновым днем.

Поведение относительных амплитуд ВВ также существенно изменялось в зависимости от фазы ионосферной бури. Так, 20 марта, в период положительной фазы, значения δ_N были в $1,5 \div 4$ раза меньше, чем в последующие дни. В течение отрицательной фазы, напротив, наблюдалось увеличение в $2 \div 3$ раза значений δ_N , особенно в верхней части области F ионосферы. Здесь относительная амплитуда достигала $40 \div 80$ %.

Опишем далее особенности ВВ, сопровождавших магнитные бури. Выше отмечалось, что магнитные, ионосферные и атмосферные бури представляют собой проявление единого процесса – геокосмической бури. Последняя вызывается мощными нестационарными “порывами” солнечного ветра. Усилившиеся “порывы” сопровождаются инъекцией энергии и частиц в геокосмосферу. В результате этого атмосфера нагревается, в термосфере существенно изменяется градиент температуры, усиливаются атмосферные ветры. В полярных областях (широта около $\pm 70^\circ$) генерируются ВВ, которые распространяются преимущественно к экватору.

Если нагрев атмосферы приводит к деформации “стенок” атмосферного (точнее термосферного) волновода и его высоты расположения, то вариации концентрации электронов в ионосфере обуславливают существенные изменения абсолютных и относительных амплитуд ВВ. Об этом свидетельствуют результаты моделирования и наблюдений.

Вариации характеристик ВВ, сопровождавших описанные выше МБ, отличались многообразием так же, как отличаются многообразием сами магнитные бури.

Строго говоря, нет двух подобных МБ. Заметно изменялся спектральный состав ВВ, однако периоды преобладающих колебаний находились в пределах 30 ÷ 120 мин.

10.3 Характеристики волновых возмущений

Основными характеристиками ВВ являются частота их появляемости, периоды, длины волн в горизонтальной λ_x и вертикальной λ_z плоскостях, проекции скоростей $v_{x,z}$ распространения, амплитуды и др.

Как оказалось, ВВ в диапазоне периодов 30 ÷ 60 мин наблюдались практически всегда и на всех высотах (~100 ÷ 500 км). Их максимальная амплитуда изменялась в пределах $10^{10} \div 10^{11} \text{ м}^{-3}$, а относительная амплитуда – от единиц до многих десятков процентов. Высотный ход ΔN и δ_N часто был немонотонным. При этом на высотах $z \approx 200 \div 300$ км имели место максимумы в зависимостях $\Delta N(z)$ и $\delta_N(z)$, причина появления которых обсуждается далее. Основные параметры термосферного волновода такие: высота была около 200 км, а его эффективная толщина составляла 150 ÷ 200 км.

На высотах $z \leq 200 \div 250$ км время появления одного и того же пакета ВВ обычно зависело от значения z : на меньших высотах пакет появлялся позже, чем на больших. При разности высот Δz_p в 20 км время запаздывания Δt_p в спокойных условиях изменялось в пределах 10 ÷ 20 мин, что соответствовало $v_z = \Delta z_p / \Delta t_p \approx 17 \div 34$ м/с. При $T \approx 30 \div 60$ мин значения $\lambda_z \approx 30 \div 120$ км. В течение МБ 25 сентября $\Delta t_p = 3 \div 5$ мин и $v_z \approx 90 \div 60$ м/с. При $T \approx 60$ мин имеем $\lambda_z \approx 320 \div 220$ км.

При исследовании естественных ВВ не удавалось определить горизонтальные составляющие v_x и λ_x , так как неизвестно было место генерации этих возмущений. Для ВГВ их можно вычислить, если учесть, что при $\lambda_z^2 \ll \lambda_x^2$ и $\lambda_z \ll H$ ($H \approx 30 \div 50$ км – приведенная высота атмосферы на высотах термосферы) $\lambda_x = \lambda_z T / T_B$ [119, 120, 162], где $T_B \approx 15$ мин – период Брента-Вяйсяля. Например, при $v_z = 90$ м/с, $T = 60$ мин

имеем $\lambda_x = 1280$ км. Для проекций групповых и фазовых скоростей при этом справедливы следующие соотношения [162, 163]

$$v_{gx} = -v_{gz} \frac{T}{T_B}, \quad v_x = v_z \frac{T_B}{T}.$$

При тех же значениях T и v_z имеем $v_x \approx 22$ м/с, $v_{gx} \approx 360$ м/с.

Амплитуда ВВ зависит от их природы. Периоды $T \geq 15$ мин могут иметь медленные МГД, магнитоградиентные и гравитационные волны (см. также выше). Два первых типа волн так или иначе связаны с плазменными процессами, а третий тип – с процессами в нейтральной атмосфере. По видимому, волны с периодами более 15 мин чаще всего обусловлены генерацией и распространением гравитационных волн. Именно они через столкновения с нейтралами “навязывают” волновые движения ионизированной компоненте атмосферы на высотах F-области ионосферы. Рассмотрим это подробнее.

Для ионосферы на высотах 100 ÷ 500 км, где применимо квазигидродинамическое описание плазмы, с учетом соударений электронов с ионами, рекомбинационных процессов и произвольной зависимости приведенной высоты атмосферы $H(z)$, следуя [162], можно получить такие уравнения для δ_N [144]:

$$\delta_N = \frac{|K_z| u_{zm}}{|\tilde{\omega}|} e^{\xi/2} = \delta_{N0} e^{\xi/2}, \quad z \leq 200 \text{ км}, \quad (6)$$

$$\delta_N = \frac{2\Theta H u_{zm}}{D_0} \sqrt{\frac{\kappa^2 + 1}{F_1(\kappa)}} e^{-\xi/2}, \quad z \geq 200 \text{ км}, \quad (7)$$

где, $K_z = k_z - i/2H$, k_z – проекция (на направление **В**) волнового вектора, $\tilde{\omega} = -i\omega_{N0} + \omega$, $\omega_{N0} = \omega_{N0}^{-1}$, ω – частота волн, $D_0 = D_{|\zeta=0}$, D – продольная (по отношению к геомагнитному полю) составляющая тензора амбиполярной диффузии, $\Theta = H_p / H$, $\kappa = 2k_z H$,

$F_1(\kappa) = \Theta^2 \kappa^4 + 2(\Theta^2 + 2\Theta + 2)\kappa^2 + (6 - \Theta)^2$ вауют на порядок при увеличении высоты от 200 ÷ 300 до 500 км.

$\zeta = \int_0^z dz/H(z)$, u_{zm} – амплитуда проекции скорости частиц в волне, $H_p = k(T_e + T_i)/m_i g$.

Из (6) и (7) видно, что в нижней части F-области $\delta_N \sim e^{\zeta/2}$, а в верхней $\delta_N \sim e^{-\zeta/2}$. На высоте около 200 км δ_N достигает своего максимального значения. На малых высотах сохраняется плотность кинетической энергии в волне и $\delta_N \sim u_{zm} \sim e^{\zeta/2}$. На больших высотах роль диффузии становится определяющей ($D \sim e^{\zeta}$), поэтому здесь $\delta_N \sim e^{-\zeta/2}$. В одних случаях такое поведение $\delta_N(z)$ качественно согласуется с описанными выше результатами наблюдений. В других случаях высотная зависимость амплитуд ВВ была иной. Различие могло быть связано с более сложной картиной волноводного распространения ВВ, горизонтальной неоднородностью среды, влиянием нелинейных эффектов, неустойчивостью ВВ к малым пертурбациям и т.п.

Таким образом, роль ВВ во взаимодействии подсистем в системах СМСМИ-А3 и ЗАИМ – велика [163 – 168].

10.4 Основные результаты исследования волновых возмущений

Установлено, что ВВ в ионосфере существуют практически всегда, при любых состояниях космической погоды. Воздействие источников энерговыделения и вариации параметров системы ЗАИМ приводят к изменению характера ВВ, их спектрального состава и амплитуды.

В дневных условиях в нижней части F-области ионосферы (до 200, а иногда 300 км) амплитуды ВВ обычно возрастали с ростом высоты. В ночных условиях подобный эффект уверенно не наблюдался. В ночное время на этих высотах амплитуда ВВ в 2 ÷ 10 раз меньше, чем в дневное время.

В дневных условиях в верхней части F-области ионосферы (высоты от 200 ÷ 300 до 500 км) амплитуды ВВ постепенно убы-

вают на порядок при увеличении высоты от 200 ÷ 300 до 500 км.

Относительные амплитуды ВВ δ_N в нижней части F-области ионосферы в ночное время превышали дневные значения и достигали десятков процентов. При этом, однако, возрастала и погрешность оценки δ_N . Это было обусловлено низкими значениями N и отношения сигнал/шум.

Существенная высотная зависимость амплитуд ВВ, с одной стороны, отражает высотный ход регулярных профилей электронной концентрации. С другой стороны, эта зависимость, по-видимому, свидетельствует в пользу волноводного распространения ВВ с периодами 30 ÷ 120 мин. Центр атмосферного волновода обычно располагался на высоте около 200 км. Эффективная толщина волновода изменялась в пределах 150 ÷ 200 км.

Теоретические расчеты показали, что на высотах 125 ÷ 170 км должен иметь место экспоненциальный рост (с постепенно увеличивающимся от ~ 25 до ~ 60 км масштабом) относительных амплитуд ВВ, вызванный ростом амплитуды возмущающей силы. Последний обусловлен сохранением плотности кинетической энергии ВГВ. На высотах около 180 ÷ 200 км относительная амплитуда должна достигать своего максимального значения. Выше она должна убывать также по экспоненциальному закону с масштабом около 100 км. Такое поведение обусловлено ростом роли амбиполярной диффузии по мере увеличения высоты от ~ 200 до 400 км.

Результаты наблюдений и расчетов в ряде случаев хорошо соответствовали друг другу. В целом же высотная зависимость ВВ более сложная, чем это следует из схематически изложенной выше и более подробно описанной в работах [144, 148] простой теоретической модели.

11 Обсуждение

До последнего времени процессы во всех внутренних и внешних геосферах нередко рассматриваются, как правило, изолированно друг от друга. Модели соответствующих процессов чаще всего предполагаются стационарными, равновесными и линейными. Вместе с тем результаты, по-

лученные международным сообществом в ходе исследования естественных высокоэнергичных явлений и в процессе проведения активных экспериментов, показали, что понять все многообразие явлений невозможно без целостного (системного) восприятия объекта исследования – планеты Земля с ее внутренними и внешними оболочками, – испытывающие на себе влияние Солнца, метеоров, галактических лучей и т. п.

Особое место в свойствах систем СМСМИАЗ и ЗАИМ занимает свойство эмергентности, появление триггерных механизмов высвобождения запасенной энергии. Такие механизмы найдены во всех подсистемах. Важно, что коэффициент триггерности может быть не просто большим, а очень большим (например, $10^9 - 10^{10}$).

При проведении активных экспериментов (а также в случае крупных аварий и катастроф, крупномасштабных военных действий) энерговыделение стало сравнимым с энерговыделением, имеющим место при протекании многих естественных процессов. Это позволило смоделировать целый ряд природных явлений, оценить “порог уязвимости” подсистем, выявить новые взаимосвязи между подсистемами, определить механизмы переноса возмущений, идентифицировать скорости их распространения. Оказалось, что возмущения, вызванные источниками энерговыделения различной физической природы, переносятся при помощи одних и тех же волн (табл. 7 приложения).

Важными и часто неожиданными следствиями наблюдений за высокоэнергичными явлениями как естественного, так и искусственного происхождения стало следующее.

1) Вклад потоков энергии "сверху" и "снизу" в систему ЗАИМ в ряде случаев может быть сопоставим. Это необходимо учитывать при изучении и прогнозировании состояния космической погоды.

2) Воздействие на одну из подсистем приводит к активной перестройке характера взаимодействия между подсистемами, к проявлению ряда нелинейных свойств системы и ее подсистем.

3) Локальные (такие как взрывы, старты ракет) и локализованные (такие как грозы, землетрясения, тропические циклоны) источники способны вызывать крупномасштабные и даже глобальные возмущения в системе ЗАИМ.

4) Среднеширотное высыпание энергичных частиц из радиационного пояса сопровождает большинство воздействий на одну из подсистем в системе ЗАИМ (табл. 8 приложения).

Источники энерговыделения различной физической природы способны вызывать в средних широтах потоки энергичных электронов с плотностью $10^7 - 10 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

5) В системе возможны триггерные механизмы высвобождения энергии.

6) Значительная роль во взаимодействии подсистем принадлежит ВВ. Волны являются переносчиком энергии и импульса между подсистемами.

В данной работе рассмотрены также вопросы антропогенного воздействия на систему ЗАИМ: эффекты крупномасштабных неядерных военных действий, а также аварий и катастроф на военных объектах и базах. Эти эффекты в целом напоминают эффекты, возникающие в ходе запланированных АЭ. По этой причине ВД, аварии и катастрофы на военных объектах представляют собой разновидность АЭ. Их последствия проявляются во всех подсистемах системы ЗАИМ. Они могут давать ощутимый вклад в вариации атмосферной и космической погоды, а также во взаимодействии двух погодных систем.

12 Заключение

Перечислены сформулированные автором в 1970 – 1980 гг. основные положения системной парадигмы.

Системная парадигма должна стать основой теории, методом и методологией изучения систем СМСМИАЗ и ЗАИМ как сложного открытого диссипативного неравновесного нелинейного объекта

1. Продемонстрировано, что образования СМСМИАЗ и ЗАИМ являются сложными открытыми неравновесными нелинейными системами

2. Показано, что к важнейшим свойствам систем СМСМИАЗ и ЗАИМ относится возможность появления триггерных механизмов высвобождения энергии. В ряде случаев коэффициент триггерности может достигать значений $10^5 - 10^{10}$.

3. Продемонстрировано, что высокоэнергичные явления (землетрясения, вулканизм, грозы, мощные атмосферные процессы, тропические циклоны, терминатор, затмения Солнца, вспышки на Солнце, геокосмические бури и т.п.) вызывают целый комплекс процессов в системах СМСМИАЗ и ЗАИМ, приводят к перестройке характера взаимодействий подсистем, к накоплению и высвобождению энергии.

4. Показано, что тропический циклон – одно из систематически возникающих самых высокоэнергетических крупномасштабных атмосферных образований на нашей планете – является элементом системы океан–атмосфера–ионосфера–магнитосфера, а значит и системы ЗАИМ. Тропический циклон играет определяющую роль в глобальном массо- и энергообмене в системе ЗАИМ.

Построены основы схематизированной модели основных процессов в системе океан–атмосфера–ионосфера–магнитосфера.

Продемонстрировано, что подсистемы и вся система в целом являются нелинейными.

Указаны механизмы взаимодействия подсистем. Воздействие циклона на верхнюю атмосферу, ионосферу и магнитосферу осуществляется, по крайней мере, по трем каналам: акустико-гравитационному, электромагнитному (магнитному) и электрическому, с которыми связаны генерация волн и полей соответствующей природы.

5. Активные эксперименты оказались удобными и эффективными средствами для моделирования процессов в подсистемах и их взаимодействия.

6. Крупномасштабные неядерные военные действия, а также аварии и катастрофы на военных складах и базах, являясь разновидностью активных экспериментов, приводят к комплексу эффектов не только на поверхности планеты и в приземной атмосфере, но и в остальных частях

атмосферы, в ионосфере и в магнитосфере, т. е. в системе ЗАИМ в целом. Энергетика соответствующих процессов может быть значительной.

7. Особая роль во взаимодействии подсистем в системе ЗАИМ принадлежит волновым процессам. Показано, что волновые возмущения на высотах 60 – 600 км существуют практически всегда. Их относительная амплитуда изменяется от единиц до десятков процентов, величина периода – от 10 до 150 – 200 мин и более. Параметры волновых возмущений существенно изменяются при вариациях потоков энергии как “сверху”, так и “снизу”. Значительна также роль пульсаций магнитного поля Земли (периоды 1 – 1000 с).

8. Показано, что высыпание энергичных электронов в средних широтах сопровождается большинством нестационарных процессов в системах СМСМИАЗ и ЗАИМ. Их потоки составляют величину порядка $10^7 - 10^9 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Обоснованы механизмы, приводящие к высыпанию частиц. К ним относятся замедление энергичных электронов в ионосферно-магнито-сферном квазистатическом электрическом поле и передача их энергии шумовому ОНЧ-излучению.

Список литературы

1 Черногор Л. Ф. I. Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля как открытая неравно-весная нелинейная физическая система // Журнал проблем эволюции открытых систем. – 2011. – Вып. 13. – Т. 1. – С. 22 – 66.

2 Garmash K. P., Gokov A. M., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Fedorenko Y. P., Tsymbal A. M., and Chernogor L. F. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. Technical Facilities // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – V. 53. – No. 4 – 5. – Pp. 6 – 20.

3 Garmash K. P., Gokov A. M., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Fedorenko Y. P., Tsymbal A. M., and Chernogor L. F. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by

Sources of Various Nature. 2. Processes in a Modified Ionosphere. Signal Parameter Variations. Disturbance Simulation // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – V. 53. – No. 6. – Pp. 1 – 22.

4 Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф. и др. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1. – ЗР. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – № 7. – С. 3 – 15.

5 Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф. и др. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 2. – ЗР. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – № 8. – С. 3 – 19.

6 Черногор Л. Ф. Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта “Попередження” // Космічна наука і технологія. – 1999. – Т. 5. – № 1. – С. 38 – 47.

7 Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. – М.: Наука. – 1973.

8 Gurevich A. V. Nonlinear Phenomena in the Ionosphere. – Springer-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin. – 1978.

9 Молчанов О. А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. – М.: Наука. – 1985.

10 Митяков Н. А., Грач С. М., Митяков Н. С. Возмущение ионосферы мощными радиоволнами / В кн.: Итоги науки и техники. ВИНТИ. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. – Т. 9. – Москва. – 1989.

11 Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Электромагнитные и геофизические эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения // Электромагнитные явления. – Харьков, 1998. – Т. 1. – № 1. – С. 90 – 110;

12 Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения // ЗР. Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – № 6. – С. 17 – 40.

13 Гоков А. М., Мартыненко С. И., Мисюра В. А. и др. Профили электронной

концентрации в ночной высокоширотной нижней ионосфере, искусственно возмущенной мощными радиоволнами // Геомагнетизм и аэрономия. – 1982. – Т. 22. – № 5. – С. 748 – 752.

14 Черногор Л. Ф. Нестационарные процессы в ионосфере, возмущенной мощным радиоизлучением // XIV Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. – Тезисы докладов. – Часть 1. – М.: Наука. – 1984. – С. 117.

15 Черногор Л. Ф. Возмущение неоднородной структуры в нижней ионосфере под действием мощного радиоизлучения. – Изв. вузов. Радиофизика. – 1985. – Т. 28. – № 1. – С. 17 – 26.

16 Черногор Л. Ф. Нерезонансный нагрев ионосферно-магнитосферной плазмы ОНЧ-НЧ радиоизлучением наземного источника // XIX Всероссийская научная конференция по распространению радиоволн. – Тезисы докладов. – Казань. – 1999. – С. 355.

17 Chernogor L. F. Non-Resonance Magnetosphere Heating by High-Power VLF Radio Waves // 8-th Scientific Assembly of IAGA with ICMA and STP Symposia, IAGA. – Abstract Book. – 1997. – P. 346.

18 Гуревич А. В., Шлюгер И. С. Исследование нелинейных явлений при распространении мощного радиоимпульса в нижних слоях ионосферы. – Изв. вузов. Радиофизика. – 1975. – Т. 18. – № 9. – С. 1237 – 1260.

19 Васьков В. В., Димант Я. С., Рябова Н. А. и др. Тепловые возмущения магнитосферной плазмы при резонансном нагреве F-слоя ионосферы полем мощной радиоволны // Геомагнетизм и аэрономия. – 1992. – Т. 32. – № 5. – С. 140 – 152.

20 Duncan L. M., Sheerin J. P., Benhke R. A. Observations of ionospheric cavities generated by high-power radio waves. – Phys. Rev. Lett. – 1988. – V. 61. – No 2. – Pp. 239 – 242.

21 Васьков В. В., Комраков Г. П., Рябова Н. А. Тепловые возмущения околоземной плазмы, создаваемые мощным радиоизлучением комплекса “СУРА” // Геомагнетизм и аэрономия. – 1995. – Т. 35. – № 5. – С. 75 – 82.

- 22 Гуревич А. В., Зыбин К. П., Карлсон Х. С. Эффект магнитного зенита // Изв. вузов. Радиофизика. – 2005. – Т. 48. – № 9. – С. 772 – 787.
- 23 Блюх Ю. П., Любарский М. Г., Подобинский В. О., Файнберг Я. Б. Нагрев ионосферной плазмы стохастическим электромагнитным излучением // Физика плазмы. – 1993. – Т. 19. – № 3. – С. 442 – 444.
- 24 Блюх Ю. П. Нагрев электронов в поле стохастической потенциальной волны магнитоактивной плазмы // Физика плазмы. – 1995. – Т. 21. – № 8. – С. 702 – 707.
- 25 Черногор Л. Ф. Генерация пульсаций геомагнитного и геоэлектрического полей под действием мощной обыкновенной радиоволны, отраженной от ионосферы // Космические исследования на Украине. – 1981. – Вып. 15. – С. 67 – 72.
- 26 Черногор Л. Ф. О насыщении уровня искусственных возмущений геомагнитного и геоэлектрического полей // Геофизический журнал. – 1982. – Т. 4. – № 2. – С. 86 – 91.
- 27 Черногор Л. Ф. Возможность генерации геомагнитных и геофизических возмущений под действием наземных установок УКВ диапазона // Геофизический журнал. – 1983. – Т. 5. – № 5. – С. 45 – 50.
- 28 Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шварцбург А. Б. Возникновение крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых мощным нестационарным радиоизлучением // Компьютерная оптика. – 1988. – Вып. 6. – С. 62 – 71.
- 29 Беспалов П. А., Трахтенгерц В. Ю. Альвовские мазеры. – Горький: ИПФ АН СССР. – 1986.
- 30 Stubbe P., Kopka H. Generation of Pc5 pulsations by polar electrojet modulation: first experimental evidence // J. Geophys. Res. – 1981. – V. A86. – No 3. – Pp. 1606 – 1608.
- 31 Черногор Л. Ф., Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г., Шамота М. А. Согласованные квазипериодические вариации уровня геомагнитных пульсаций и доплеровского смещения частоты ракурсно-рассеянных искусственными ионосферными неоднородностями радиоволн декаметрового диапазона // Изв. вузов. Радиофизика. – 2010. – Т. 53. – № 12. – С. 766 – 785.
- 32 Chernogor L. F., Vertogradov G. G., Uryadov V. P., Vertogradova E. G., Shamota M. A. Consistent Quasi-Periodic Variations of the Geomagnetic Pulsation Level and Doppler Frequency Shift of Decametric Radio Waves Aspect-Scattered by Artificial Field-Aligned Ionospheric Irregularities // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2010. – V. 53. – No 12. – Pp. 688 – 705.
- 33 Черногор Л. Ф. Статистические характеристики крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых воздействием мощного нестационарного излучения // Геомагнетизм и аэрномия. – 1989. – Т. 29. – № 3. – С. 513 – 515.
- 34 Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование крупномасштабных волновых возмущений в ионосфере, генерируемых мощным радиоизлучением // Геомагнетизм и аэрномия. – 1990. – Т. 30. – № 1. – С. 159 – 161.
- 35 Wright J. W. Evidence of Precipitation of Energetic Particles by Ionospheric “Heating” Transmissions // J. Geophys. Res. – 1975. – V. 80. – No 31. – Pp. 4383 – 4386.
- 36 Черногор Л. Ф. Фазовые вариации километровых радиоволн, сопутствовавшие воздействию на ионосферу мощного радиоизлучения // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14. – № 4. – С. 377 – 389.
- 37 Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. Вариации параметров рассеянных сигналов и ионосферы, сопутствовавшие воздействию на плазму мощного радиоизлучения // Известия вузов. Радиофизика. – 2009. – Т. 52. – № 11. – С. 859 – 880.
- 38 Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Комраков Г. П., Пушин В. Ф. Вариации спектра ионосферных волновых возмущений при периодическом нагреве плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением // Изв. вузов. Радиофизика. – 2011. – Т. 54. – № 2. – С. 81 – 96.
- 39 Гармаш К. П., Леус С. Г., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Вариации амплитудно-фазовых характеристик ВЧ-радиоволн на слабонаклонных трассах, сопровождавшие нагрев ионосферы мощным периодическим радиоизлучением и про-

- хождение солнечного терминатора // Нелинейный мир. – 2011. – № 7. – С. 416 – 435.
- 40 Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. Перемещающиеся ионосферные возмущения, генерируемые периодическим нагревом плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением. // Изв. вузов. Радиофизика. – 2012. – Т. 55. – № 1 – 2. – С. 14 – 36.
- 41 Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф., Панасенко С. В., Урядов В. П. Аперiodические крупномасштабные возмущения в Е-области ионосферы, стимулированные мощным радиоизлучением // Изв. вузов. Радиофизика. – 2012. – Т. 55. – № 3. – С. 173 – 185.
- 42 Домнин И. Ф., Панасенко С. В., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований волновых процессов в ионосферной плазме в период ее нагрева мощным радиоизлучением стенда “Сура” // Изв. вузов. Радиофизика. – 2012. – Т. 55. – № 4. – С. 280 – 293.
- 43 Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Пушин В. Ф. Колебания инфразвукового диапазона в ионосфере при воздействии на неё мощным радиоизлучением // Изв. вузов. Радиофизика. – 2012. – Т. 55. – № 5. – С. 1 – 14.
- 44 Черногор Л. Ф. Механизмы генерации колебаний инфразвукового диапазона в верхней атмосфере под действием мощного периодического радиоизлучения // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17. – № 3. – С. 240 – 252.
- 45 Гульельми А. В., Довбня Б. В., Клайн Б. И., Пархомов В. А. Стимулированное возбуждение альвеновских волн в околоземной плазме импульсным радиоизлучением // Геомагнетизм и аэрoномия. – 1978. – Т. 18. – № 1. – С. 179 – 181.
- 46 Гульельми А. В., Зотов О. Д., Клайн Б. И. и др. Возбуждение геомагнитных пульсаций при периодическом нагреве ионосферы мощным КВ-радиоизлучением // Геомагнетизм и аэрoномия. – 1985. – Т. 25. – № 1. – С. 102 – 106.
- 47 Костин В. М., Романовский Ю. А., Чмырев В. М. Спутниковые исследования возмущений внешней ионосферы при воздействии мощных КВ-радиоволн на F-область ионосферы // Космические исследования. – 1993. – Т. 31. – Вып. 1. – С. 84 – 92.
- 48 Васьков В. В., Будько Н. И., Гдалевич Г. Л. и др. Обнаружение на спутнике “Интеркосмос – 24” ОНЧ- и КНЧ-волн, возбуждаемых в ионосфере мощным КВ-радиоизлучением стенда “Сура” // Геомагнетизм и аэрoномия. – 1995. – Т. 35. – № 1. – С. 98 – 106.
- 49 Васьков В. В., Комраков Г. П., Ораевский В. Н. и др. Возникновение плазменных шумов при воздействии мощной радиоволны на F-слой ионосферы по данным спутника “АПЭКС” // Геомагнетизм и аэрoномия. – 1995. – Т. 35. – № 1. – С. 154 – 158.
- 50 Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду / Под ред. Адушкина В. В., Козлова С. И., Петрова А. В. – Справочное пособие. – М.: Анкил. – 2000.
- 51 Власов М. Н., Кричевский С. В. Экологическая опасность космической деятельности. – М.: Наука. – 1999.
- 52 Черногор Л. Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина. – 2009.
- 53 Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere // Radio Physics and Radio Astronomy. – 1998. – V. 3. – No 2. – Pp. 191 – 197.
- 54 Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999, – Т. 4. – № 3. – С. 227 – 246.
- 55 Бурмака В. П., Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8. – № 2. – С. 143 – 162.
- 56 Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозонди-

рование возмущений в E- и F-областях ионосферы при стартах и полетах космических аппаратов // *Космічна наука і технологія. ДОДАТОК.* – 2003. – Т. 9. – № 2. – С. 132 – 143

57 Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты комплексных радиофизических наблюдений волновых возмущений в геокосмосе, сопровождающих старты и полеты ракет // *Космічна наука і технологія. ДОДАТОК.* – 2003. – Т. 9. – № 2. – С. 57 – 61.

58 Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Результаты доплеровских наблюдений возмущений в геокосмосе, сопутствовавших полетам космических аппаратов // *Космічна наука і технологія. ДОДАТОК.* – 2003. – Т. 9. – № 2. – С. 76 – 81.

59 Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старты ракет на фоне естественных нестационарных процессов // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2004. – Т. 9. – № 1. – С. 5 – 28.

60 Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // *Геомagnetизм и аэрономия.* – 2004. – Т. 44. – № 4. – С. 518 – 534.

61 Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Ionospheric Wave Disturbances Accompanied by Rocket Launches against a Background of Natural Transient Processes // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2004. – V. 44. – No 4. – Pp. 476 – 491.

62 Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Радарные наблюдения волновых процессов в ионосфере, сопутствовавших полетам космических аппаратов // *Космічна наука і технологія.* – 2004. – Т. 10. – № 5/6. – С. 113 – 117.

63 Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Волновые процессы в F-области ионосферы, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Байконур // *Геомagnetизм и аэрономия.* – 2006. – Т. 46. – № 6. – С. 783 – 800.

64 Burmaka V. P., Lysenko V. N., Chernogor L. F., and Chernyak Yu. V. Wave-Like Processes in the Ionospheric F Region

that Accompanied Rocket Launches from the Baikonur Site // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2006. – V. 46. – No 6. – Pp. 742 – 759.

65 Бурмака В. П., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Волновые возмущения в геокосмосе, сопровождавшие старты и полеты ракет “Союз” и “Протон” // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2005. – Т. 10. – № 3. – С. 254 – 272.

66 Бурмака В.П., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // *Успехи современной радиоэлектроники.* – 2007. – № 11. – С. 3 – 24.

67 Черногор Л. Ф. Эффекты в геокосмосе, сопутствовавшие стартам группы ракет // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2008. – Т. 13. – № 1. – С. 39 – 53.

68 Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // *Геомagnetизм и аэрономия.* – 2008. – Т. 48. – № 5. – С. 681 – 702.

69 Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Вариации геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам и полетам космических аппаратов // *Космічна наука і технологія.* – 2007. – Т. 13. – № 6. – С. 87 – 98.

70 Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Волновые возмущения геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Плесецк // *Космічна наука і технологія.* – 2008. – Т. 14. – № 3. – С. 29 – 38.

71 Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов КНР // *Космічна наука і технологія.* – 2008. – Т. 14. – № 4. – С. 92 – 101.

72 Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов Мыс Канаврал и Куру // *Космічна наука і технологія.* – 2008. – Т. 14. – № 6. – С. 89 – 98.

73 Черногор Л. Ф. Флуктуации геомагнитного поля вблизи г. Харькова, сопровождавшие старты ракет с космодрома Байконур // *Геомagnetизм и аэрономия.* – 2009. – Т. 49. – № 3. – С. 403 – 415.

- 74 Chernogor L. F. Geomagnetic Field Fluctuations near Kharkov, which Accompanied Rocket Launches from the Baikonur Site // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2009. – V. 49. – № 3. – Pp. 384 – 396.
- 75 Chernogor L. F. Advanced Methods of Spectral Analysis of Quasiperiodic Wave-Like Processes in the Ionosphere: Specific Features and Experimental Results // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2008. – V. 48. – No 5. – Pp. 652 – 673.
- 76 Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с различных космодромов мира // *Космічна наука і технологія.* – 2009. – Т. 15. – № 1. – С. 31 – 43.
- 77 Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Комплексная диагностика параметров ионосферной плазмы вдали от траектории стартующих ракет // *Геомагнетизм и аэронаука.* – 2009. – Т. 49. – № 5. – С. 667 – 682.
- 78 Burmaka V. P., Chernogor L. F. Complex Diagnostics of Disturbances in the Ionospheric Plasma Parameters Far from the Trajectories of Launched Rockets // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2009. – V. 49. – No 5. – Pp. 637 – 652.
- 79 Черногор Л. Ф. Магнито-ионосферные эффекты активных экспериментов, проведенных 18 февраля 2004 г. // *Космические исследования.* – 2011. – Т. 49. – № 4. – С. 302 – 317.
- 80 Chernogor L. F. Magneto-Ionospheric Effects of Active Experiments Conducted on February 18, 2004 // *Cosmic Research.* – 2011. – V. 49. – No 4. – Pp. 292 – 307.
- 81 Chernogor L. F., Zhivolup T. G. Comparative analysis of ionospheric effects as observed during "Proton" rocket flights under different space weather conditions // *Radio Physics and Radio Astronomy.* – 2011. – V. 3. – No 2. – Pp. 139 – 148.
- 82 Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. – М.: Энергоиздат. – 1982.
- 83 Хантадзе А. Г. О новой ветви собственных колебаний электропроводящей атмосферы // *Докл. РАН.* – 2001. – Т. 376. – № 2. – С. 250 – 252.
- 84 Абурджания Г. Д., Хантадзе А. Г. Крупномасштабные электромагнитные волновые структуры в E – области ионосферы // *Геомагнетизм и аэронаука.* – 2002. – Т. 42. – № 2. – С. 245 – 251.
- 85 Хантадзе А. Г. Электромагнитные планетарные волны в земной ионосфере // *Геомагнетизм и аэронаука.* – 2002. – Т. 42. – № 3. – С. 333 – 335.
- 86 Альперович Л. С., Гохберг М. Б., Дробжев В. И. и др. Проект МАССА – исследование магнитосферно-атмосферных связей при сейсмоакустических явлениях // *Физика Земли.* – 1985. – № 11. – С. 5 – 8.
- 87 The effects of nuclear weapons. Eds S. Glasstone, P.J. Dolan. Third Edition. – US Department of Defense, US Department of Energy. – 1977.
- 88 Альперович Л. С., Пономарев Е. А., Федорович Г. В. Моделируемые взрывом геофизические явления (Обзор). – Физика Земли. – 1985. – № 11. – С. 9 – 20.
- 89 Шалимов С. Л. О параметрическом усилении магнитного поля в неоднородной слабоионизованной плазме // *Физика плазмы.* – 1997. – Т. 23. – № 7. – С. 670 – 671.
- 90 Шалимов С. Л., Гохберг М. Б. Нелинейный отклик ионосферы на импульсное акустическое воздействие // *ДАН.* – 1999. – Т. 368. – № 2. – С. 250 – 253
- 91 Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу // М.: Наука. – 2008.
- 92 Гармаш К. П., Гритчин А. И., Леус С. Г. и др. Исследование реакции ионосферной плазмы на воздействие подземных, наземных, воздушных взрывов и землетрясений // *Физика космической плазмы.* – Сборник трудов Международного семинара, 6 – 10 июня 1993 года, Киев, Украина. – Киев: Национальное космическое агентство Украины, Главная астрономическая обсерватория АН Украины, Киевский университет им. Тараса Шевченка. – 1994. – С. 151 – 160.
- 93 Михайлов Ю. М., Михайлова Г. А., Капустина О. В. ОНЧ-эффекты во внешней ионосфере от подземного ядерного взрыва 24 октября 1990 г. на о. Новая Земля (данные ИСЗ "Интеркосмос – 24") // *Геомагнетизм и аэронаука.* – 1998. – Т. 38. – № 6. – С. 66 – 72.

- 94 Похотелов О. А., Липеровский В. А., Фомичев Ю. П. и др. Модификация ионосферы во время военных действий в зоне Персидского залива // Докл. АН. – 1991. – Т. 321. – № 6. – С. 1168 – 1172.
- 95 Николаев А. В., Жигалин А. Д. Геоэкологические аспекты военной деятельности // Геоэкология. – 2003. – № 1. – С. 23 – 31.
- 96 Адушкин В. В., Горелый К. И. Доплеровское зондирование ионосферы над Югославией во время военных действий в Косово // Докл. АН. – 2000. – Т. 373. – № 1. – С. 87 – 89.
- 97 Будыко М. И., Голицын Г. С., Израэль Ю. А. Глобальные климатические катастрофы. – М.: Гидрометеиздат. – 1986.
- 98 Климатические и биологические последствия ядерной войны / Ответственный редактор Велихов Е. П. – М.: Наука. – 1987.
- 99 Питток Б., Акермен Т., Крутцен П. и др. Последствия ядерной войны. Физические и атмосферные эффекты. Пер. с англ. – М.: Мир. – 1988.
- 100 Харуэлл М., Хатчинсон Т., Кроппер-мл. У. и др. Последствия ядерной войны. Воздействие на экологию и сельское хозяйство. Пер. с англ. – М.: Мир. – 1988.
- 101 Черногор Л. Ф. Физические процессы в околоземной среде, сопровождавшие военные действия в Ираке (март – апрель 2003 г.) // Космічна наука і технологія. – 2003. – Т. 9. – № 2/3. – С. 13 – 33.
- 102 Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф: Монография. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина. – 2012.
- 103 Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. О генерации электрических волн в верхней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. – 1990. – Т. 30. – № 5. – С. 869 – 871.
- 104 Анисимов С. В., Мареев Е. А. Спектры пульсаций электрического поля приземной атмосферы // Докл. АН. – 2001. – Т. 381. – С. 107 – 112.
- 105 Дмитриев Э. М., Анисимов С. В. Отклик атмосферного электрического поля на изменение проводимости в приземной атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. – 1994. – Т. 34. – № 3. – С. 97 – 103.
- 106 Пулинец С. А., Хегай В. В., Боярчук К. А., Ломоносов А. М. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // УФН. – 1998. – Т. 168. – № 5. – С. 582 – 589.
- 107 Сорокин В. М., Чмырев В. М. Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф // Геомагнетизм и аэрономия. – 2002. – Т. 42. – № 6. – С. 821 – 830.
- 108 Nickolaenko A. P. The rocket flare as a fair weather field converter into low frequency emission // J. Atmos. Electr. – 1995. – V. 15. – Pp. 5 – 10.
- 109 Rycroft M. J., Israelsson S., Price C. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2000. – V. 62. – Pp. 1563 – 1576.
- 110 Исаев Н. В., Сорокин В. М., Чмырев В. М. и др. Возмущение электрического поля в ионосфере морскими штормами и тайфунами // Космические исследования. – 2002. – Т. 40. – № 6. – С. 591 – 597.
- 111 Маршалл В. Основные опасности химических производств. Пер. с англ. – М.: Мир. – 1989.
- 112 Черногор Л. Ф. Взрывы боеприпасов на военных базах – источник экологических катастроф в Украине // Экологія і ресурси. – 2004. – Вип. 10. – С. 55 – 67.
- 113 Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и геоэкологические последствия массовых химических взрывов на военных складах в г. Артемовске // Геофизический журнал. – 2004. – Т. 26. – № 4. – С. 31 – 44.
- 114 Черногор Л. Ф. Экологические последствия массовых химических взрывов при техногенной катастрофе // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2006. – № 6. – С. 522 – 535.
- 115 Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и экологические последствия пожара и взрывов на военной базе вблизи г. Мелитополь // Геофизический журнал. – 2004. – Т. 26. – № 6. – С. 61 – 73.
- 116 Черногор Л. Ф. Геоэкологические последствия взрыва склада боеприпасов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидро-

геология. Геокриология. – 2008. – № 4. – С. 359 – 369.

117 Черногор Л. Ф. Взрывы на газопроводах и аварии на газовых хранилищах – источник экологических катастроф в Украине // *Екологія і ресурси*. – 2008. – № 3. – С. 56 – 72.

118 Черногор Л. Ф. Найбільша аварія на газоконденсатному родовищі на Харківщині та її наслідки // *Національна безпека: український вимір*. – 2009. – № 4 (23). – С. 59 – 70.

119 Данилов А. Д., Казимировский Э. С., Вергасова Г. В. и др. Метеорологические эффекты в ионосфере. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1986.

120 Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. – М.: Мир. – 1978.

121 Атмосфера. Справочник. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1991.

122 Гармаш К. П., Леус С. Г., Пазюра С. А. и др. Статистические характеристики флуктуаций электромагнитного поля Земли // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2003. – Т. 8. – № 2. – С. 163 – 180.

123 Гармаш К.П., Леус С.Г., Поднос В.А. и др. Модернизированный измерительный пункт Радиофизической обсерватории ХНУ имени В.Н. Каразина // *Вісник Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка*. – 2010. – № 942. – Вып. 17. – С. 101 – 108.

124 Лазоренко О. В., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Адаптивное преобразование Фурье // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2005. – Т. 10. – № 10. – С. 39 – 49.

125 Chui C. K., editor. *Wavelets: A Tutorial in Theory and Applications*. – Academic Press, New York. – 1992.

126 Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. – М.: Мир. – 2005.

127 Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Применение вейвлет-анализа к задаче обнаружения сверхширокополосных сигналов на фоне помех // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2002. – Т. 7. – № 1. – С.46 – 63.

128 Григоренко Е. И., Лазоренко С. В., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождаю-

щие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. // *Геомagnetизм и аэрономия*. – 2003. – Т.43. – № 6. – С. 770 – 787.

129 Гармаш К. П., Лазоренко С. В., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Флуктуации электромагнитного поля Земли во время самой большой геокосмической бури 1999 г. // *Радиофизика и радиоастрономия* – 2003. – Т. 8. – № 3. – С. 252 – 263.

130 Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Применение вейвлет-анализа в задачах космической физики и космической радиофизики // *Космічна наука і технологія. ДОДАТОК*. – 2003. – Т. 9. – № 2. – С. 91 – 96.

131 Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Применение вейвлет-анализа к задаче обнаружения кратковременных знакопеременных и сверхширокополосных процессов // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2004. – Т. 9. – № 9 – 10. – С. 31 – 61.

132 Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Вейвлет-анализ нелинейных волновых процессов // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2005. – № 10. – С. 3 – 21.

133 Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Вейвлет-анализ в задачах физики геокосмоса // *Космічна наука і технологія*. – 2005. – Т. 11. – № 5/6. – С. 97 – 104.

134 Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Системный спектральный анализ сигналов: теоретические основы и практические применения // *Радиофизика и радиоастрономия* – 2007. – Т. 12. – № 2. – С. 162 – 181.

135 Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Вейвлет-анализ модельных сигналов с особенностями. 1. Непрерывное вейвлет-преобразование // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2007. – Т. 12. – № 2. – С. 182 – 204.

136 Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Вейвлет-анализ модельных сигналов с особенностями. 2. Аналитическое и дискретное вейвлет-преобразования // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2007. – Т. 12. – № 3. – С. 278 – 294.

137 Костров Л. С., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Доплеров-

ское радиозондирование ионосферы как средство мониторинга состояния космической погоды // *Космічна наука і технологія. ДОДАТОК.* – 2003. – Т. 9. – № 2. – С. 144 – 151.

138 Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в околоземной плазме при помощи спутниковых радиомаяков // *Космічна наука і технологія.* – 2004. – Т. 10. – № 2/3. – С. 16 – 21.

139 Костров Л. С., Федоренко Ю. П., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере при помощи доплеровского ВЧ-радары // *Космічна наука і технологія.* – 2004. – Т. 10. – № 2/3. – С. 22 – 27.

140 Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Радарные наблюдения квазипериодических процессов в мезосфере. 1. Теоретические основы и результаты компьютерного моделирования // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2004. – Т. 9. – № 4. – С. 404 – 416.

141 Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в мезосфере // *Космічна наука і технологія.* – 2004. – Т. 10. – № 5/6. – С. 122 – 127.

142 Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Радарные методы наблюдения квазипериодических процессов в мезосфере. 2. Методика и результаты наблюдения // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2005. – Т. 10. – № 1. – С. 38 – 49.

143 Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Черногор Л. Ф. Исследование волновых возмущений электронной концентрации с помощью радиопросвечивания ионосферы когерентными сигналами навигационных спутников Земли // *Успехи современной радиоэлектроники.* – 2005. – № 1. – С. 36 – 80.

144 Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // *Успехи современной радиоэлектроники.* – 2005. – № 3. – С. 4 – 35.

145 Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований волновых возмущений в нижней ионосфере

// *Успехи современной радиоэлектроники.* – 2005. – № 7. – С. 38 – 56.

146 Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых процессов в ионосфере при различных состояниях космической погоды // *Космічна наука і технологія.* – 2005. – Т. 11. – № 1/2. – С. 37 – 57.

147 Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л., Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 1. Результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // *Геомагнетизм и аэрномия.* – 2006. – Т. 46. – № 2. – С. 190 – 208.

148 Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л., Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 2. Анализ результатов наблюдений и моделирование // *Геомагнетизм и аэрномия.* – 2006. – Т. 46. – № 2. – С. 209 – 218.

149 Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Выявление волновых возмущений в мезосфере с помощью СЧ – ВЧ – радара // *Геомагнетизм и аэрномия.* – 2006. – Т. 46. – № 4. – С. 525 – 535.

150 Panasenko S. V., Chernogor L. F. Detection of Wave Disturbances in the Mesosphere Using a MF – HF Radar // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2006. – V. 46. – No 4. – Pp. 496 – 506.

151 Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Оптимальное обнаружение и оптимальное оценивание параметров кратковременных квазипериодических процессов // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2007. – Т. 12. – № 1. – С. 61 – 75.

152 Бурмака В.П., Черногор Л.Ф. Волновые возмущения в ионосфере в период весеннего равноденствия 2006 г. // *Космічна наука і технологія.* – 2008. – Т. 14. – № 4. – С. 82 – 91.

153 Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Комплексная диагностика ионосферной плазмы, возмущенной удаленными стартами ракет // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2009. – Т. 14. – № 1. – С. 26 – 44.

154 Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы: Монография. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина. – 2009.

- 155 Живолуп Т. Г., Черногор Л. Ф. Ионосферные эффекты в течение полета ракеты "Протон": результаты вертикального зондирования // *Космічна наука і технологія*. – 2010. – Т. 16. – № 3. – С. 25 – 31.
- 156 Живолуп Т. Г., Черногор Л. Ф. Ионосферные эффекты в течение полетов ракеты "Союз" в спокойных и магнитовозмущенных условиях // *Космічна наука і технологія*. – 2010. – Т. 16. – № 3. – С. 32 – 41.
- 157 Гуляев Ю. В., Панасенко С. В., Потапов А. А., Черногор Л. Ф. Оптимальное обнаружение и оптимальное оценивание параметров солитона огибающей // *Доклады академии наук*. – 2011. – Т. 436. – № 5. – С. 606 – 610.
- 158 Gulyaev Yu. V., Panasenko S. V., Potapov A. A., Chernogor L. F. Optimal Detection and Optimal Estimation of Parameters of the Envelope Soliton // *Doklady Physics*. – 2011. – V. 56. – No 2. – Pp. 73 – 77.
- 159 Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Волновая активность в ионосфере в течение магнитосферной бури 7 – 10 ноября 2004 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2011. – Т. 51. – № 3. – С. 309 – 324.
- 160 Burmaka V. P., Chernogor L. F. Wave Activity in the Ionosphere during the Magnetospheric Storm of November 7 – 10, 2004 // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2011. – V. 51. – No 3. – Pp. 305 – 320.
- 161 Сомсиков В. М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. – Алма-Ата: Наука. – 1983.
- 162 Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. – М.: Наука. – 1974.
- 163 Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Метеорологические эффекты в ионосфере (Обзор) // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1995. – Т. 35. – № 3. – С. 1 – 23.
- 164 Черногор Л. Ф., Розуменко В. Т. Физические эффекты в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях // *Космічні дослідження в Україні 2008 – 2010*. – Звіт підготовлений Інститутом космічних досліджень НАН України та НКА України. – Київ – 2011. – С. 16 – 23.
- 165 Chernogor L., Rozumenko V. Physical effects in the geospace environment under quiet and disturbed conditions // *Space Research in Ukraine*. – The Edition Report Prepared by the Space Research Institute of NAS of Ukraine and NSA of Ukraine. – 2011. – Pp. 22 – 34.
- 166 Chernogor L. F. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes // *International Journal of Remote Sensing*. – 2011. – V. 32. – No 11. – Pp. 3199 – 3218.
- 167 Черногор Л. Ф. Каналы воздействия вариаций космических и атмосферных факторов на биосферу и человека // *Фізіологічний журнал*. – 2010. – Т. 56. – № 3. – С. 25 – 40.
- 168 Потапов А. А., Черногор Л. Ф. Физические процессы в нелинейной системе Космос – Земля: каналы воздействия на биосферу (человека) // *Нелинейный мир*. – 2010. – Т. 8. – № 6. – С. 347 – 360.

Принято в печать 21.03.2013

Приложение

Таблица 1. Результаты расчета величины нагрева электронов для различных высот (подсистем) системы ЗАИМ ($L=2$) в зависимости от частоты мощного радиоизлучения

f , кГц	z , км	ΔT_e , К (День)	ΔT_e , К (Ночь)	Примечание
1	75	0,3	10	Коэффициент прохождения $k_1 = 0,1$; фактор нелинейного поглощения $k_2 \approx 1$ ночью и $k_2 \approx 0,3 - 0,7$ днем
	110	$3 \cdot 10^{-3}$	0,2	
	300	$3 \cdot 10^{-3}$	0,1	
	1000	$2 \cdot 10^{-2}$	0,1	
	6400	3	1	
10	75	15	150	$k_1 = 0,1$; $k_2 \approx 0,95 - 0,98$ ночью $k_2 \approx 0,1 - 0,5$ днем
	110	0,1	30	
	300	0,2	1	
	1000	2	10	
	6400	10^3	100	
100	75	80	700	$k_1 = 0,4$; $k_2 \approx 0,92 - 0,98$ ночью и $k_2 \approx 10^{-3} - 0,2$ днем
	110	0,4	250	
	300	0,1	30	
	1000	0,2	300	
	6400	30	$4 \cdot 10^3$	
1000	75	Пренебрежимо мала	$2,5 \cdot 10^3$	$k_1 = 1$ ночью и $k_1 = 0,4$ днем; $k_2 \approx 4 \cdot 10^{-3} - 1$ ночью Существенно самовоздействие радиоволны
	110		$4,1 \cdot 10^3$	
	300		10^2	
	1000		$3,4 \cdot 10^2$	
	6400		10^2	

Таблица 2. Требуемые значения плотности потока поглощаемой мощности радиоволны и эффективной мощности радиосистемы для увеличения температуры электронов в области ВГР в два раза

α	Время суток	f , МГц	P_c , Вт/м ²	P_{ab} , Вт/м ²	PG , МВт	N_0 , м ⁻³	T_{e0} , К	$t_{Г0}$, с
0°	Ночь	3,2	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	12	10^{11}	800	12
	День	10	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	5600	$1,1 \cdot 10^{12}$	2000	6
30°	Ночь	3,2	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	20	10^{11}	800	12
	День	10	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	2400	$1,1 \cdot 10^{12}$	2000	6
60°	Ночь	3,2	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	22	10^{11}	800	12
	День	10	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	1900	$1,1 \cdot 10^{12}$	2000	6
90°	Ночь	3,2	$9 \cdot 10^{-6}$	$8,5 \cdot 10^{-6}$	14	10^{11}	800	12
	День	10	$9,5 \cdot 10^{-6}$	$9,3 \cdot 10^{-6}$	110	$1,1 \cdot 10^{12}$	2000	6

Таблица 3. Зависимость основных параметров лесных пожаров и сопутствующих им физических процессов от площади пожаров

S , м ²	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8
m_1 , т	2	20	$2 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^6$
m_2 , т	0,2	2	20	$2 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$
m_3 , т	0,1	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5
Q , ТДж	$2 \cdot 10^{-2}$	0,2	2	20	$2 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$
P , МВт	5	50	$5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$
v_c , м/с	1,1	1,6	2,3	3,4	5,2	7,3	11

z_{tm} , км	0,4	0,7	1,2	2,1	4	7	12
P_a , кВт	15	$1,5 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^7$
f_r , Гц	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
f_t , Гц	0,1	$6,3 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
$\Delta B(R_0)$, пТл	1	3,2	10	32	10^2	$3,2 \cdot 10^2$	10^3
ε_L , кэВ	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}	0,3	1	3

Таблица 4. Параметры физико-химических процессов, сопровождающих военные действия в Ираке (в скобках масса пыли, заброшенной на большие высоты)

Параметр	Взрывы	Городские пожары	Горение нефтяных сважин	Горение нефтехранилищ	Полеты летательных аппаратов
Масса прореагировавшего вещества, кг	$1,5 \cdot 10^7$	10^7	$3,7 \cdot 10^{10}$	$7,8 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^7$
Масса дыма, кг	–	10^6	$3,7 \cdot 10^9$	$7,8 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^6$
Масса CO ₂ , кг	$5 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	10^{11}	$3 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^8$
Масса С, кг	–	$5 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^9$	$3,9 \cdot 10^7$	10^5
Масса пыли, кг	$3 \cdot 10^8$ ($7,5 \cdot 10^7$)	–	–	–	–
Энерговыделение, Дж	$6 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{14}$	$1,5 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{16}$	$1,6 \cdot 10^{15}$
Средняя продолжительность, с	10^6	10^5	$2 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^5$	10^5
Средняя мощность, Вт	$6 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^9$	$7,4 \cdot 10^{11}$	10^{11}	$1,6 \cdot 10^{10}$
Акустическая энергия, Дж	$6 \cdot 10^{12}$	10^{12}	$4,5 \cdot 10^{15}$	10^{14}	$4 \cdot 10^{12}$
Акустическая мощность, Вт	$6 \cdot 10^6$	10^7	$2,3 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^7$
Энергия вторичных процессов, Дж	$2 \cdot 10^{19}$	$1,7 \cdot 10^{17}$	$1,3 \cdot 10^{22}$	$4 \cdot 10^{19}$	Незначительна
Мощность вторичных процессов, Вт	$2 \cdot 10^{13}$	$1,7 \cdot 10^{12}$	$6,5 \cdot 10^{15}$	$1,3 \cdot 10^{14}$	Незначительна
Коэффициент усиления энергии	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^2$	$8,7 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$	–

Таблица 5. Массы аэрозолей и химических веществ, инжектированных в атмосферу в ходе военных действий в Ираке

Вещество	Инжектированная масса, кг	Фоновое значение во всей атмосфере, кг	Фоновое значение в атмосфере над Ираком, кг
Пыль	$7,5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^{10} \div 2,5 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^7 \div 2 \cdot 10^8$
Дым	$4 \cdot 10^9$	$5,5 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^6$
Двуокись углерода	10^{11}	$3 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{12}$
Окись углерода	$4 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^8$
Углерод	$2 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^5$
Углеводороды:	СН ₄	$2 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^{12}$
	С ₂ Н ₆	$2 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^9$
	другие	$2 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$

Окислы	серы	$9 \cdot 10^7$	$9 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^5$
	азота	$7 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^5$
Кислоты	H ₂ SO ₄	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^6$
	HNO ₃	$1,5 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^9$	10^6
	HCl	10^8	10^9	$8 \cdot 10^5$

Таблица 6. Массы аэрозолей, химических веществ и энергия акустического излучения, инжесктированных в атмосферу в ходе катастрофы под Мелитополем (площадь города около 30 км²), и их сравнение с фоновыми значениями

Вещество (излучение)	Инжесктируемая масса (мощность)	Фоновое значение в атмосфере над Мелитополем	Фоновое значение в атмосфере над Украиной	Фоновое значение во всей атмосфере
Аэрозоли (пыль)	0,1 – 1 кт	3 – 15 т	60 – 300 кт	50 – 250 Мт
Аэрозоли (дым)	1 кт	330 кг	6 – 7 кт	5,5 Мт
Двуокись углерода	35 кт	180 кт	3,6 Гт	3 Тт
Окись углерода	5 кт	30 т	600 кт	0,5 Гт
Углерод (сажа)	500 т	30 кг	600 т	0,5 Мт
Акустическое за счет:	взрывов	0,2 – 1,4 ГВт		
	пожаров	15 МВт	10 – 30 кВт	200 – 600 МВт
				150 – 500 ГВт

Таблица 7. Типы волн, переносящих возмущения на глобальные расстояния

Тип волны	Фазовая скорость, км/с	Период, с	Декремент затухания, км ⁻¹	Среда распространения
Акустическая	0,3 – 0,7	10^2 – 300	10^2 – 10^5	Атмосфера (z ≤ 400 км)
Внутренняя гравитационная	0,3 – 0,7	>300	10^4 – 10^3	Атмосфера (z ≤ 400 км)
Медленная	10 – 1	10^2 – 10^4	$2 \cdot 10^3$ – $2 \cdot 10^4$	Е-область ионосферы
МГД	50 – 5	То же	10^3 – 10^4	Ф-область ионосферы
Сейсмическая: продольная поперечная	6,5 – 7,5 4 – 5	0,1 – 30 То же	10^5 – 10^3 То же	Литосфера То же
Магнитоградиентная [151]: день ночь	~0,3 – 1 ~1 – 5	$3 \cdot 10^4$ – $2 \cdot 10^5$ $5 \cdot 10^2$ – $5,4 \cdot 10^3$	Не оценивался Не оценивался	Е-область ионосферы То же
Гиротропная: день ночь	10 – 100 100 – 1000	10 – 10^4 То же	Не оценивался Не оценивался	Е-область ионосферы То же
МГД	~1000	> 10^2	< 10^5 – 10^4	Ионосфера, магнитосфера

Таблица 8. Параметры потоков высыпающихся энергичных частиц и производимая ими ионизация. Здесь q – скорость ионизации, Δq – ее возмущение, ΔN – увеличение концентрации электронов по сравнению с фоновым значением N , P_p – плотность потока энергии высыпающихся электронов, Π – плотность потока высыпающихся электронов с энергией ε .

Событие	Дата	Вид частиц	Высота, км	$N, \text{м}^{-3}$	$\Delta N, \text{м}^{-3}$
Магнитная буря	15.06.83	Электроны (протоны)	55 – 60	10^8	$3 \cdot 10^8$
	15.05.97	Электроны	84	$1,2 \cdot 10^9$	$0,5 \cdot 10^9$
Протонная вспышка	25.02.91	Электроны (протоны)	72,5	10^9	$5 \cdot 10^9$
Терминатор вечерний утренний	24.05.97	Электроны	80	10^9	10^9
	25.05.97			$8 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$
Середина ночи	25.05.97	Электроны	90	—	$3 \cdot 10^8$
Затмение Солнца	11.08.99	Электроны	84	$3 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^8$
Землетрясение	24.08.99	Электроны	84	$5 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^8$
Старт КА	15.05.87	Электроны	80	10^9	10^9
Мощное ВЧ радиоизлучение	01.03.91	Электроны	88	$4 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$

Продолжение таблицы 8

Событие	Дата	Вид частиц	Высота, км	$q, \text{м}^{-3} \text{с}^{-1}$	$\Delta q, \text{м}^{-3} \text{с}^{-1}$	$P_p, \text{Вт/м}^2$	$\Pi, \text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$
Магнитная буря	15.06.83	Электроны (протоны)	55 – 60	10^5	$15 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^7$
	15.05.97	Электроны	84	$1,4 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$(7,8 \cdot 10^5)$ $3,8 \cdot 10^8$
Протонная вспышка	25.02.91	Электроны (протоны)	72,5	10^7	$35 \cdot 10^7$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^9$
Терминатор вечерний утренний	24.05.97	Электроны	80	10^7	$3 \cdot 10^7$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^8$
	25.05.97			$6,4 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^8$
Середина ночи	25.05.97	Электроны	90	—	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^6$
Затмение Солнца	11.08.99	Электроны	84	$9 \cdot 10^5$	$55 \cdot 10^5$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^7$
Землетрясение	24.08.99	Электроны	84	$2,5 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^6$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$6,6 \cdot 10^7$
Старт КА	15.05.87	Электроны	80	$3 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^6$	10^{-6}	$2 \cdot 10^8$
Мощное ВЧ радиоизлучение	01.03.91	Электроны	88	$1,3 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^8$

Ф. Черногор

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Украина, г. Харьков

СОЛНЦЕ – МЕЖПЛАНЕТНАЯ СРЕДА – МАГНИТОСФЕРА – ИОНОСФЕРА – АТМОСФЕРА – ЗЕМЛЯ КАК ОТКРЫТАЯ НЕРАВНОВЕСНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. 2

Аннотация. Изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований, подтверждающих, что *образование Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля (СМСМИАЗ)* является сложной открытой динамической нелинейной системой.

Активные эксперименты (и их разновидности – аварии и катастрофы) в системе СМСМИАЗ показали ограниченность линейного описания реакции подсистем на мощное энерговыделение, позволили установить возможность возникновения крупномасштабных и глобальных возмущений при локальном и локализованном энерговыделении, а также выявить и идентифицировать типы волн, переносящих указанные возмущения.

Установлено, что высыпание энергичных частиц из магнитосферы в средних широтах сопровождает большинство нестационарных процессов в системе СМСМИАЗ

Ключевые слова: система, подсистема, солнечная система, частицы, открытая динамическая нелинейная система, возмущения, масштабы, аварии, катастрофы, энерговыделение, волны.

L. F. Chernogor

Sun – Interplanetary medium – Magnetosphere – Ionosphere – Atmosphere – Earth as Opened Nonequilibrium Nonlinear Physical System. 2

The results of experimental and theoretical studies indicate that the Sun – interplanetary medium – magnetosphere – ionosphere – atmosphere – Earth system (SIMMIAES) is a complex open dynamic nonlinear system.

The active experiments in the SIMMIAES have established the limitation of the linear description of the subsystem response to powerful energy releases, determined the possibility of large-scale and global-scale perturbation onset from local and localized energy releases, as well as revealed and identified the types of waves transferring these disturbances.

It has been determined that energetic particle precipitation from the magnetosphere at middle latitudes accompanies the majority of nonsteady processes in the SIMMIAES.

Л. Ф. Черногор

В. Н. Каразин атындағы Харьков ұлттық университеті, Украина, Харьков қаласы

КҮН – ЖЕР – АТМОСФЕРА – ИОНОСФЕРА – МАГНИТОСФЕРА – ПЛАНЕТА АРАЛЫҚ ОРТА БҮЛ АШЫҚ ТЕПЕ-ТЕҢ ЕМЕС СЫЗЫҚТЫ ЕМЕС ФИЗИКАЛЫҚ ЖҮЙЕ. 2

Аннотация Күн – планета аралық орта – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Жербеті (КПОМИАЖ) құрылымы күрделі ашық динамикалық сызықты емес жүйесі болып табылатынын растайтын эксперименталді және теориялық зерттеулер нәтижелері баяндалған.

КПОМИАЖ жүйесінде белсенді эксперименттер (және олардың түрлері – авариялар және катастрофалар) қуатты энергия шығуға ішкі жүйелердің реакцияның сызықты сипаттамасы шектеулі екенін көрсетті, жергілікті және жергілікті шектелген энергия бөліну кезінде үлкен масштабты және жаһандық толқулар пайда болудың, сонымен бірге көрсетілген толқуларды тасымалдайтын толқындардың түрлерін анықтауға және сәйкестендіруге мүмкіндік берді.

Орта ендіктерде магнитосферадан жігерлі бөлшектердің төгілуі КПОМИАЖ жүйесінде стационарлық емес процестердің көпшілігімен бірге жүретіні анықталған.

Маңызды сөздер: Күн, планета аралық орта, магнитосфера, ионосфера, атмосфера, Жер, күрделі ашық динамикалық сызықты емес жүйе.