

**Пенталогия докладов**  
**«Действие ядерного взрыва на металлические**  
**конструкции и электронные схемы РЭО»**

Научный сотрудник кафедры теоретической физики физического факультета  
ОмГУ

Попов Иван Сергеевич



**Ядерный взрыв** – явление, начинающееся с момента создания условий для осуществления цепных реакций деления или реакций синтеза взрывного типа в небольшом объёме на время порядка от нескольких наносекунд до нескольких миллисекунд и заканчивающееся распадом распределённых по атмосфере и поверхности земного шара радиоактивных продуктов взрыва в течение многих лет.



В связи с подписанием и ратификацией РФ договора 1996 г о всеобъемлющем запрещении проведения испытаний ядерного оружия, особую актуальность приобретает моделирование воздействия ядерных взрывных устройств.

В связи с высокой стоимостью физического моделирования данных воздействий, актуальность приобретают методы математического и компьютерного моделирования воздействия взрыва, точность и адекватность которых в последние годы гораздо превосходит методы физического моделирования.

## **Серия докладов:**

- 1) Взаимодействие ионизирующих излучений с преградой.
- 2) Вторичные электромагнитные эффекты ядерного взрыва.
- 3) Взаимодействие полей ЭМИ ядерного взрыва с объектами.
- 4) Действие ионизирующих излучений и ЭМИ ядерного взрыва на проволочные антенны.
- 5) Действие излучений на электронные системы.

## **Аннотация пенталогии докладов:**

Будут рассмотрены и охарактеризованы современные методы моделирования взаимодействия ионизирующих излучений с преградой сложной геометрии; также будут рассмотрены результаты проведённых исследований действия ядерного взрыва



## **Классификация ядерных взрывных устройств по принципу энерговыделения поражающих факторов:**

- Атомные.
- Обыкновенные термоядерные.
- Многоступенчатые.
  - Трёхступенчатые на реакции Джекилла-Хайда.
  - Ядерные взрывные устройства с большим числом ступеней.
- Специальные.
  - Нейтронные.
  - Чистые.
  - Радиологические.

## **Классификация ядерных взрывных устройств по величине энеровыделения:**

- Сверхслабые (менее 1 кт).
- Слабые (от 1 кт до 10 кт).
- Средние (от 10 кт до 100 кт).
- Мощные (от 100 кт до 1 Мт).
- Сверхмощные (более 1 Мт).

## **Ядерный взрыв:**

- Ядерный взрыв вблизи поверхности земли.
- Глубокий подземный (камуфлетный) ядерный взрыв.
- Высотный ядерный взрыв.
- Ядерный взрыв на акватории.



## **Ядерный взрыв вблизи поверхности земли и ядерный взрыв на акватории:**

- Взрыв на большой высоте.
- Наземный ядерный взрыв.
- Контактный ядерный взрыв.
  - С несущественным забором вещества поверхности.
  - С существенным забором вещества поверхности.
- Взрыв на малой глубине.
- Взрыв на большой глубине.

## **Поражающие факторы ядерного взрыва вблизи поверхности земли:**

- Мгновенные проникающие излучения.
- Электромагнитный импульс.
- Световое излучение.
- Воздушная ударная волна.
- Сейсмовзрывные волны.
- Радиационное поражение местности.

## **Поражающие факторы ядерного взрыва на акватории:**

- Мгновенные проникающие излучения.
- Световое излучение.
- Воздушная ударная волна.
- Ударная волна в воде.
- Сейсмозрывные волны.
- Поверхностные явления.
- Явления, сопутствующие султану выброса.
- Гравитационные волны.
- Радиационное заражение местности.
- Облако взрыва.
- Базисная волна.
- Перенос радиоактивных веществ течениями.

## **Высотный ядерный взрыв:**

- Взрыв на высоте до 40 км.
- Взрыв на высоте 40-80 км.
- Взрыв на высоте 80-120 км.
- Взрыв в верхней атмосфере.
- Магнитосферный ядерный взрыв.
- Ядерный взрыв в открытом космосе.

## **Поражающие факторы высотного ядерного взрыва:**

- Мгновенные проникающие излучения.
- Световое излучение.
- Ударные волны.
- Ионизированные области и плазменные образования и течения.
- Электромагнитный импульс.
  - Мгновенный высокочастотный импульс.
  - Высокочастотный импульс.
  - Магнитогидродинамический импульс.



Испытание: REDWING - Erie  
Время: 06:15. 31 мая 1956 (мест. время)  
Место: о. Runit, атолл Эниветок  
Тип взрыва: 100-м. вышка  
Мощность: 14.9 кт.



Испытание: DOMINIC - Arkansas

Время: 08:00, 27 апреля 1962 (мест. время)

Место: о. Рождества

Тип взрыва: воздушный, выс 1501 м.

Мощность: 1.09 Мт

IRM-RMMSO: JE62-00-739



Испытание: Dominic - Bighorn

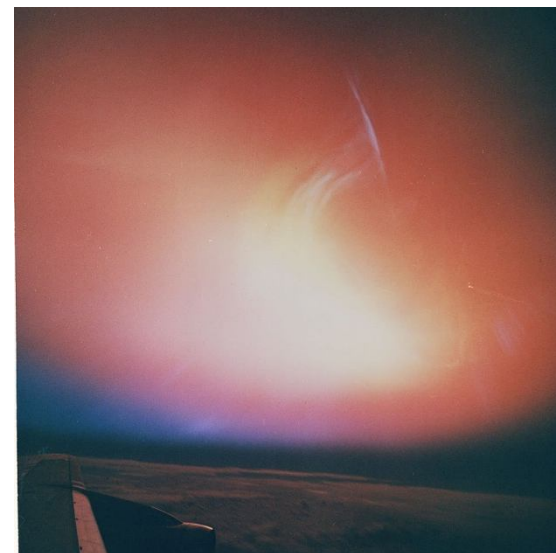
Дата: 05:19, 27 июня 1962

Место: 48 км к югу от острова Рождества

Тип взрыва: воздушный, выс. 3543 м.

Мощность: 7.6 Мт

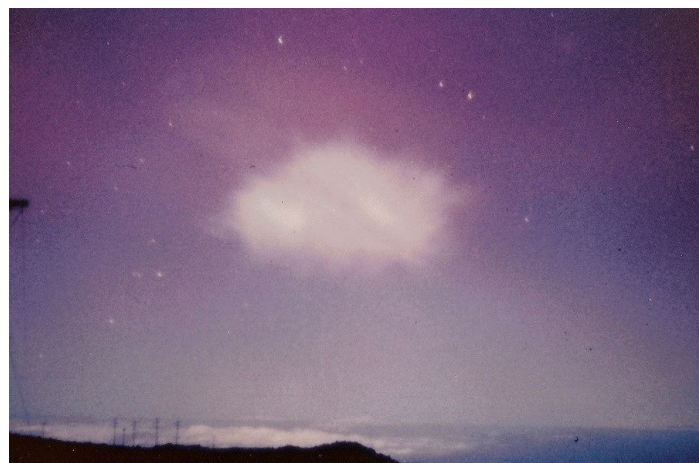




Испытание: Starfish Prime ("Морская звезда")  
Время: 23:00, 8 июля 1962 (мест. время)  
Место: Тихий океан, атолл Джонстон  
Тип взрыва: космический, высота 400 км.  
Мощность: 1.4 Мт



Hardtack - ORANGE, 13  
августа 1958 года.  
Испытание W-39 "Warhead".  
Высота взрыва: 42 км.  
Мощность: 3.8 Мт.



Hardtack TEAK, 1 августа 1958 года.

Испытание W-39 "Warhead".

Высота взрыва: 76 км.

Мощность: 3.8 Мт.



Испытание: Castle Romeo

Время: 18:30, 26 марта 1954 (GMT)

06:30, 27 марта 1954 (мест. время)

Место: На барже, над кратером от Bravo

Тип взрыва: контактный (4 м высоты)

Мощность: 11 Мт



Испытание: Castle Bravo

Время: 18:45, 28 Февраля 1954 (GMT) 06:45, 1 Марта 1954 (мест. время)

Место: искусственный остров на рифе в 885 м от о-ва Nam ("Charlie"), атолл Бикини

Тип взрыва: контактный

Мощность: 15 Мт

# **Вторичные электромагнитные эффекты ядерного взрыва**

## Цели:

- 1) Сделать обзор современных методов математического моделирования вторичных электромагнитных эффектов ядерного взрыва.
- 2) Привести некоторые современные результаты, доступные в открытой литературе, расчётов вторичных электромагнитных эффектов ядерного взрыва.
- 3) Провести моделирование развития электронных облаков вокруг корпусов космических аппаратов и возникающих помех в электрических цепях, в условиях действия на них излучений высотного ядерного взрыва.

**Вторичные электромагнитные эффекты  
ядерного взрыва — совокупность  
электродинамических процессов, сопровождающих  
совместное действие импульса ионизирующих  
излучений и электромагнитного импульса ядерного  
взрыва на объект.**



## **Физические процессы, составляющие вторичные электромагнитные эффекты:**

- 1) Разделение зарядов.
- 2) Образование радиационных электрических токов и радиационного электромагнитного поля при рассеянии и поглощении излучений в средах.

## **Электромагнитный импульс объектов с металлическими корпусами:**

- 1) Внешний ЭМИ – электромагнитное поле в окрестности объекта.
- 2) Внутренний ЭМИ – электромагнитное поле, формируемое в корпусе объекта.

# Математическая модель вторичных электромагнитных эффектов

Основные уравнения модели.

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + e c \int \vec{\beta} f(\vec{r}, \vec{p}, t) d^3 p ; \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} ; \\ \frac{\partial f(\vec{r}, \vec{p}, t)}{\partial t} + \operatorname{div}(\vec{v} f(\vec{r}, \vec{p}, t)) + \\ &+ e \operatorname{div}_p \left[ \left( \vec{E} + \mu_0 \vec{v} \times \vec{H} \right) f(\vec{r}, \vec{p}, t) \right] + \mathcal{F} f(\vec{r}, \vec{p}, t) = 0 ; \end{aligned} \tag{1}$$

## Источники первичных и вторичных электронов

$$\sigma_i^{\text{ea}}(\varepsilon, \omega, \mathcal{G}) = \frac{\partial^3 \sigma_i}{\partial \omega \partial^2 \Omega}; \quad (2)$$

$$\frac{v}{p^2} \int_{\varepsilon+I}^{2\varepsilon+I} p^2(\varepsilon') d\varepsilon' \int_{4\pi} \sigma_i^{\text{ea}}(\varepsilon', \varepsilon'-\varepsilon, \vec{\Omega}\vec{\Omega}') f[t, \vec{r}, p(\varepsilon'), \vec{\Omega}'] d^2 \vec{\Omega}';$$

$$\frac{v}{p} \int_{2\varepsilon+I}^{\infty} \frac{(p(\varepsilon'))^2}{p(\varepsilon'-\varepsilon-I)} \int_{4\pi} \sigma_i^{\text{ea}} \left[ \varepsilon', \varepsilon+I_g, \frac{p(\varepsilon')-p(\varepsilon)(\vec{\Omega}\vec{\Omega}')}{p(\varepsilon'-\varepsilon-I)} \right] \times \quad (3)$$

$$\times \Theta \left[ \frac{p(\varepsilon)(\vec{\Omega}\vec{\Omega}')}{p(\varepsilon')-p(\varepsilon'-\varepsilon-I)} \right] f[t, \vec{r}, p(\varepsilon'), \vec{\Omega}'] d^2 \vec{\Omega}';$$

## Расщепление кинетического уравнения

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial f_{\text{pri}}(\vec{r}, \vec{p}, t)}{\partial t} + \text{div}(\vec{v} f_{\text{pri}}(\vec{r}, \vec{p}, t)) + \\
 & + e \text{div}_p \left[ \left( \vec{E} + \mu_0 \vec{v} \times \vec{H} \right) f_{\text{pri}}(\vec{r}, \vec{p}, t) \right] + \mathfrak{F}_{\text{pri}} f_{\text{pri}}(\vec{r}, \vec{p}, t) = Q ; \\
 & \frac{\partial f_{\text{sec}}(\vec{r}, \vec{p}, t)}{\partial t} + \text{div}(\vec{v} f_{\text{sec}}(\vec{r}, \vec{p}, t)) + \\
 & + e \text{div}_p \left[ \left( \vec{E} + \mu_0 \vec{v} \times \vec{H} \right) f_{\text{sec}}(\vec{r}, \vec{p}, t) \right] + \mathfrak{F}_{\text{sec}} f_{\text{sec}}(\vec{r}, \vec{p}, t) = Q_{\text{sec}} ;
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\mathfrak{F}_{\text{pri}} = \mathfrak{F}_{\text{el}} + \mathfrak{F}_i ;$$

$$\begin{aligned}
 & \mathfrak{F}_i f_{\text{pri}}(\vec{r}, \vec{p}, t) = \sigma_i v f_{\text{pri}}(\vec{r}, \vec{p}, t) - \\
 & - \frac{v}{p^2} \int_{\varepsilon+1}^{2\varepsilon+1} p^2(\varepsilon') d\varepsilon' \int_{4\pi} \sigma_i^{\text{ea}}(\varepsilon', \varepsilon' - \varepsilon, \vec{\Omega}, \vec{\Omega}') f[t, \vec{r}, p(\varepsilon'), \vec{\Omega}'] d^2 \vec{\Omega}' ;
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\frac{\partial f_{\text{pri}}(\vec{r}, \vec{p}, t)}{\partial t} + \text{div}(\vec{v} f_{\text{pri}}(\vec{r}, \vec{p}, t)) + e \text{div}_{\text{p}} \times$$

$$\times \left[ \left( \vec{E} + \mu_0 \vec{v} \times \vec{H} \right) f_{\text{pri}}(\vec{r}, \vec{p}, t) - \kappa(\text{p}) \frac{\vec{p}}{p} f_{\text{pri}}(\vec{r}, \vec{p}, t) \right] + \tilde{\text{I}} f_{\text{pri}}(\vec{r}, \vec{p}, t) = Q ;$$

$$\tilde{\text{I}} f_{\text{pri}}(\vec{r}, \vec{p}, t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l Y_{lm}(\chi, \mu) v_l v f_{lm} ;$$

$$f_{\text{pri}}(\vec{r}, \vec{p}, t) = f^{\text{S}}(\vec{r}, \vec{p}, t) - \bar{f}(\vec{r}, \vec{p}, t); \tag{6}$$

$$f^{\text{S}}(\vec{r}, \vec{p}, t) = \int_0^t d\tau \int d^3\xi \int d^3\eta \left[ Q(\tau, \xi, \eta) \delta(\vec{r} - \vec{r}_s) \delta(\vec{p} - \vec{p}_s) \right] ;$$

$$\frac{\partial f^{\text{S}}(\vec{r}, \vec{p}, t)}{\partial t} + \text{div}(\vec{v} f^{\text{S}}(\vec{r}, \vec{p}, t)) +$$

$$+ e \text{div}_{\text{p}} \left[ \left( \vec{E} + \mu_0 \vec{v} \times \vec{H} \right) f^{\text{S}}(\vec{r}, \vec{p}, t) - \kappa(\text{p}) \frac{\vec{p}}{p} f^{\text{S}}(\vec{r}, \vec{p}, t) \right] = Q ;$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{f}}(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{p}}, t)}{\partial t} + \operatorname{div}(\vec{\mathbf{v}} \bar{\mathbf{f}}(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{p}}, t)) + e \operatorname{div}_{\mathbf{p}} \left[ (\vec{\mathbf{E}} + \mu_0 \vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{H}}) \bar{\mathbf{f}}(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{p}}, t) - \kappa(\mathbf{p}) \frac{\vec{\mathbf{p}}}{p} \bar{\mathbf{f}}(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{p}}, t) \right] +$$

$$+ \tilde{\mathbf{I}} \bar{\mathbf{f}}(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{p}}, t) = \tilde{\mathbf{I}} \mathbf{f}^S(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{p}}, t) ;$$

$$\mathbf{f}_{\text{pri}}(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{p}}, t) = \mathbf{f}_{00}(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{p}}, t) + \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l Y_{lm}(\chi, \mu) \mathbf{f}_{lm} ; \quad (7)$$

$$\mathbf{f}_{00}(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{p}}, t) = \int_0^t d\tau \int d^3\xi \int d^3\eta Q(\tau, \xi, \eta) \frac{\delta(\vec{\mathbf{p}} - \vec{\mathbf{p}}^S)}{p^2} \times$$

$$\times \left( C_1(t, \tau) \delta(\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}^S) + \int_{\tau}^t dt' \varpi_1 v^S(t') C_1(t', \tau) \delta(\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}^S) \right) ;$$

$$\mathbf{f}_{lm}(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{p}}, t) = \frac{1}{p^2} \int_0^t d\tau \int d^3\xi \int d^3\eta Q(\tau, \xi, \eta) \delta(\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}^S) \delta(\vec{\mathbf{p}} - \vec{\mathbf{p}}^S) \bar{Y}_{lm}^S(\chi^S, \mu^S) C_1(t, \tau) ;$$

$$C_1(t, \tau) = \exp \left( - \int_{\tau}^t dt' \varpi_1 v \left[ \vec{\mathbf{p}}^S(t') \right] \right) ;$$

## Поля вторичных электронов

$$\frac{\partial \mathbf{f}_{\text{sec}}(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{p}}, t)}{\partial t} + e \operatorname{div}_{\mathbf{p}} \left[ \vec{\mathbf{E}} \mathbf{f}_{\text{sec}}(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{p}}, t) \right] + \mathbf{f}_{\text{sec}} \mathbf{f}_{\text{sec}}(\vec{\mathbf{r}}, \vec{\mathbf{p}}, t) = Q_{\text{sec}};$$

$$d^2 \sigma_i^{\text{cl}}(\varepsilon', \varepsilon, \vartheta) = \frac{\pi e^2}{\varepsilon'} \left[ \frac{1}{(\varepsilon' - \varepsilon)^2} + \frac{1}{\varepsilon^2} \right] \delta \left( \cos \vartheta - \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon'}} \right) d(\cos \vartheta) d\omega;$$

$$d^2 \sigma_i^{\text{cl}}(\varepsilon', \varepsilon, \vartheta) = d^2 \sigma_1(\varepsilon', \varepsilon' - \varepsilon, \vartheta) + d^2 \sigma_2(\varepsilon', \varepsilon, \vartheta);$$

$$d^2 \sigma_1(\varepsilon', \varepsilon' - \varepsilon, \vartheta) = \frac{\pi e^4}{\varepsilon' \omega^2} \Delta_1(\cos \vartheta, \varepsilon', \omega) d(\cos \vartheta) d\omega; \quad (8)$$

$$d^2 \sigma_2(\varepsilon', \varepsilon' - \varepsilon, \vartheta) = \frac{\pi e^4}{\varepsilon' \omega^2} \Delta_2(\cos \vartheta, \varepsilon', \omega) d(\cos \vartheta) d\omega;$$



$$\frac{\partial f_{\text{sec}}(\vec{r}, \vec{p}, t)}{\partial t} + e \operatorname{div}_{\vec{p}} \left[ \vec{E} f_{\text{sec}}(\vec{r}, \vec{p}, t) \right] + \mathbf{f}_{\text{sec}} f_{\text{sec}}(\vec{r}, \vec{p}, t) = Q_{\text{sec}};$$

$$d^2 \sigma_i^{\text{cl}}(\varepsilon', \varepsilon, \vartheta) = \frac{\pi e^2}{\varepsilon'} \left[ \frac{1}{(\varepsilon' - \varepsilon)^2} + \frac{1}{\varepsilon^2} \right] \delta \left( \cos \vartheta - \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon'}} \right) d(\cos \vartheta) d\omega;$$

$$d^2 \sigma_i^{\text{cl}}(\varepsilon', \varepsilon, \vartheta) = d^2 \sigma_1(\varepsilon', \varepsilon' - \varepsilon, \vartheta) + d^2 \sigma_2(\varepsilon', \varepsilon, \vartheta);$$

$$d^2 \sigma_1(\varepsilon', \varepsilon' - \varepsilon, \vartheta) = \frac{\pi e^4}{\varepsilon' \omega^2} \Delta_1(\cos \vartheta, \varepsilon', \omega) d(\cos \vartheta) d\omega;$$

(9)

$$d^2 \sigma_2(\varepsilon', \varepsilon' - \varepsilon, \vartheta) = \frac{\pi e^4}{\varepsilon' \omega^2} \Delta_2(\cos \vartheta, \varepsilon', \omega) d(\cos \vartheta) d\omega;$$

$$Q_{\text{sec}}(\varepsilon, \vec{\Omega}) = \frac{2\pi e^4 N}{mc} \frac{1}{(\varepsilon + I_g)^2} \int_{\varepsilon^*}^{\infty} \frac{d\varepsilon'}{\beta(\varepsilon')} \times$$

$$\times \int d^2 \vec{\Omega}' \delta \left[ \vec{\Omega}' \vec{\Omega} - \sqrt{\frac{(\varepsilon + I_g)(\varepsilon' + 2mc^2)}{\varepsilon'(\varepsilon + 2mc^2)}} \right] f_{\text{pri}}(\varepsilon, \vec{\Omega});$$

$$\begin{aligned}
Q_{\text{sec}}(\varepsilon, \vec{\Omega}) &= \frac{2\pi e^4 N}{mc} \frac{1}{(\varepsilon + I_g)^2} \int_{\varepsilon^*}^{\infty} \frac{d\varepsilon'}{\beta(\varepsilon')} \times \\
&\times \int d^2 \vec{\Omega} \delta \left[ \vec{\Omega} \vec{\Omega} - \sqrt{\frac{(\varepsilon + I_g)(\varepsilon' + 2mc^2)}{\varepsilon'(\varepsilon + 2mc^2)}} \right] f_{\text{pri}}(\varepsilon, \vec{\Omega});
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\mathbf{\hat{\epsilon}}_i f_{\text{sec}}(\vec{r}, \vec{p}, t) = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon m}} \left[ (\varepsilon + \Delta\varepsilon_i) \sigma_i(\varepsilon + \Delta\varepsilon_i) f_{\text{sec}}(\varepsilon + \Delta\varepsilon_i, \vec{\Omega}) - \varepsilon \sigma_i(\varepsilon) f_{\text{sec}}(\varepsilon, \vec{\Omega}) \right];$$

$$\frac{\partial f_{\text{sec}}^0(\vec{r}, \vec{p}, t)}{\partial t} + \mathbf{\hat{\epsilon}}_{\text{sec}} f_{\text{sec}}^0(\vec{r}, \vec{p}, t) = Q_{\text{sec}}; \tag{11}$$

$$f_{\text{sec}}^0(t, \varepsilon) = n(t) f_{\text{st}}^0(\varepsilon);$$

$$n(t) = \iint \frac{\varepsilon(p) Q_{\text{sec}}}{\varepsilon_i} dt d^3 p;$$

$$\frac{\partial f_{\text{sec}}(\vec{r}, \vec{p}, t)}{\partial t} + e \operatorname{div}_{\vec{p}} \left[ \vec{E} f_{\text{sec}}(\vec{r}, \vec{p}, t) \right] +$$

$$+ \mathbf{F}_{\text{sec}} f_{\text{sec}}(\vec{r}, \vec{p}, t) = \frac{\partial f_{\text{sec}}^0(\vec{r}, \vec{p}, t)}{\partial t} ;$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = g(t) + pv(\varepsilon_d) G_i(\varepsilon_d, v_d) n(t);$$

$$\frac{d\vec{v}_d}{dt} = -\frac{e\vec{E}}{m} - \left[ pv(\varepsilon_d) (G_1(\varepsilon_d, v_d) + G_i(\varepsilon_d, v_d)) + \frac{g(t)}{n(t)} \right] \vec{v}_d;$$

$$\frac{d}{dt} \left[ n(t) \varepsilon_d + n(t) \frac{mv_d^2}{2} \right] + e (\vec{E} \vec{v}_d) n =$$

$$= pv(\varepsilon_d) G_2(\varepsilon_d, v_d) n(t) + pv(\varepsilon_d) G_i(\varepsilon_d, v_d) n(t) \varepsilon_g + g(t) \varepsilon_0;$$

(12)

$$\begin{aligned}
G_1(\varepsilon_d, v_d) &= \sum_i \frac{8}{3\sqrt{6\pi}} \exp\left(-\frac{3mv_d^2}{4\varepsilon_d}\right) \Psi \\
&\times \int_0^\infty dx x^2 \exp(-x) g_1\left(\sqrt{\frac{3xmv_d^2}{\varepsilon_d}}\right) \sigma_i\left(\frac{2\varepsilon_d x}{3}\right); \\
G_2(\varepsilon_d, v_d) &= \sum_i \frac{4}{\sqrt{6\pi}} \exp\left(-\frac{3mv_d^2}{4\varepsilon_d}\right) \Psi \\
&\times \int_0^\infty dx x^2 \exp(-x) g_2\left(\sqrt{\frac{3xmv_d^2}{\varepsilon_d}}\right) \Delta_i\left(\frac{2\varepsilon_d x}{3}\right) \sigma_i\left(\frac{2\varepsilon_d x}{3}\right); \\
G_i(\varepsilon_d, v_d) &= \frac{4}{\sqrt{6\pi}} \exp\left(-\frac{3mv_d^2}{4\varepsilon_d}\right) \Psi \\
&\times \int_0^\infty dx x^2 \exp(-x) g_2\left(\sqrt{\frac{3xmv_d^2}{\varepsilon_d}}\right) \Delta_i\left(\frac{2\varepsilon_d x}{3}\right) \sigma_i\left(\frac{2\varepsilon_d x}{3}\right);
\end{aligned} \tag{13}$$

# Особенности формирования электромагнитного импульса внутри объекта [1]

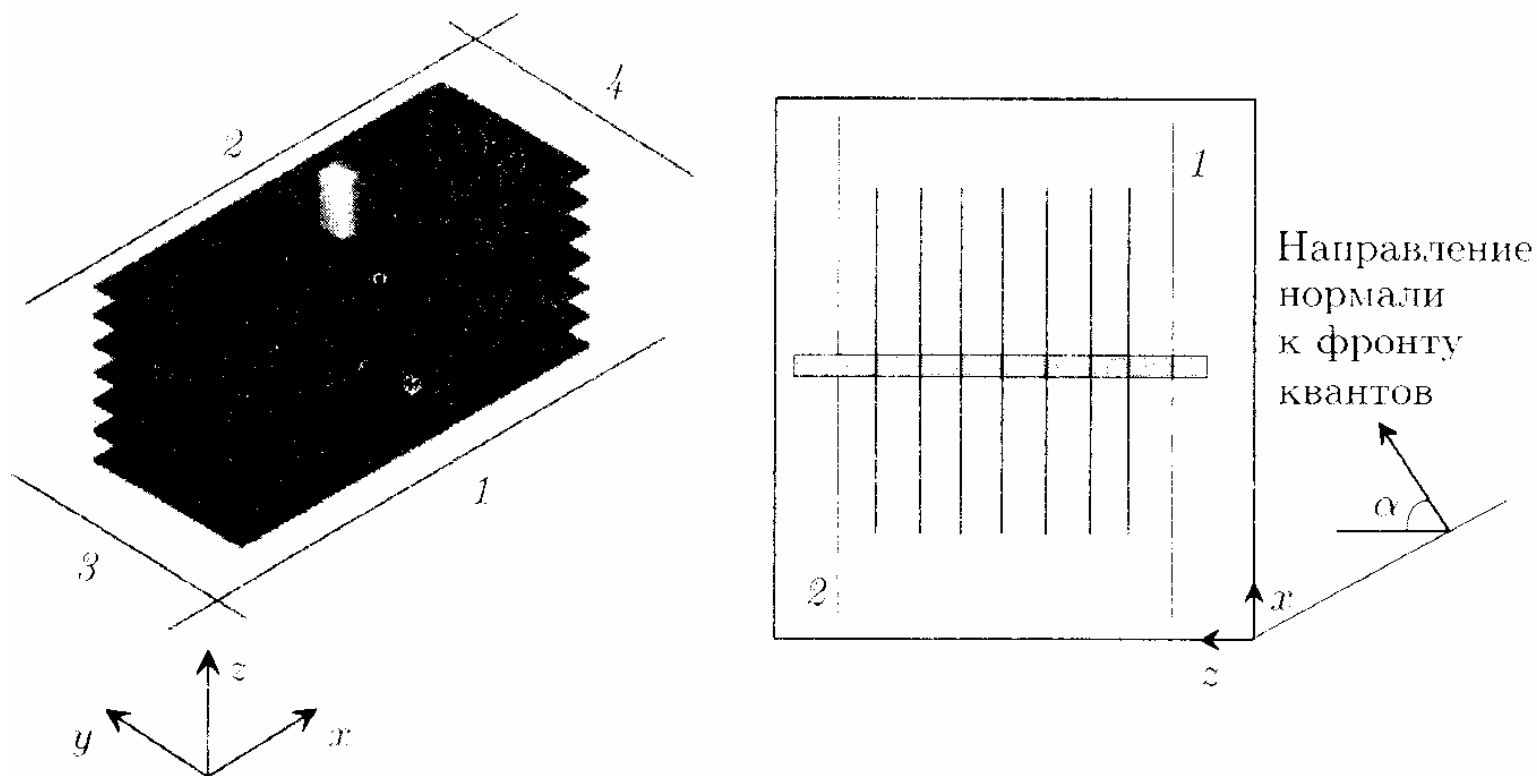


Рис. 1. Постановка задачи.

[1] Физика ядерного взрыва. Том 2. Действие взрыва. 12ЦНИИ МО РФ. 2010.

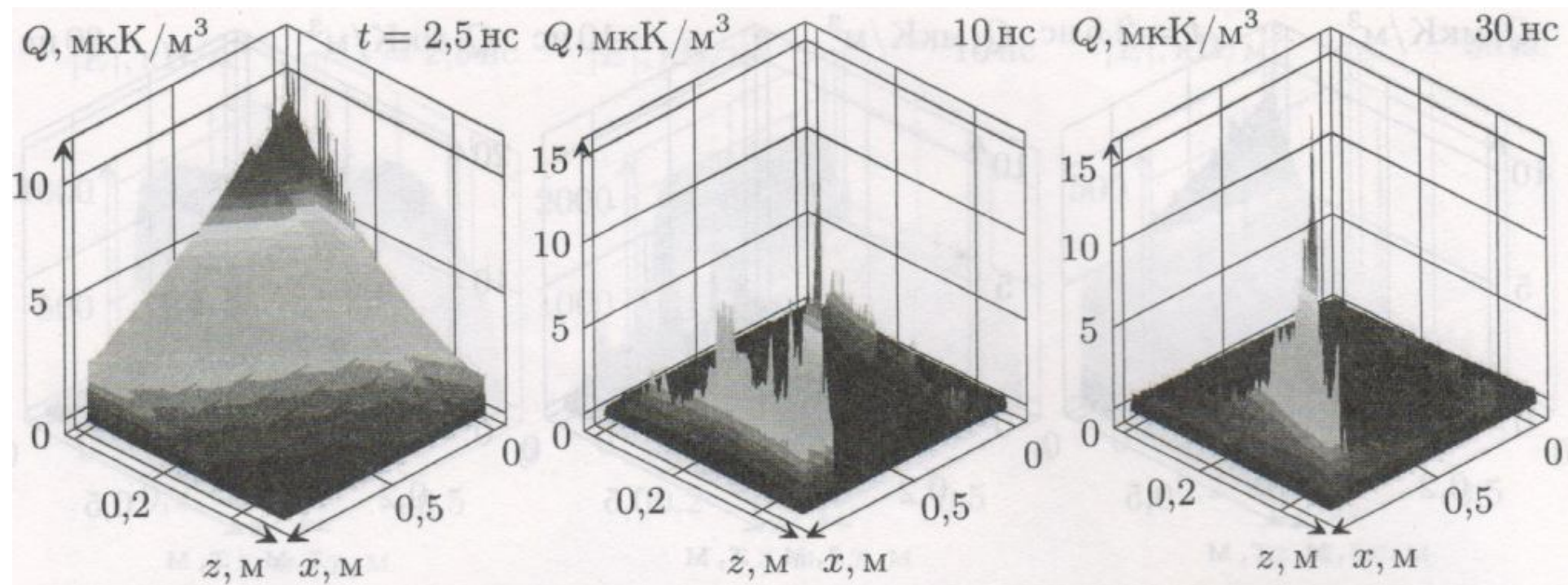


Рис. 2 Плотность заряда гамма-электронов при угле падения  $\alpha = 20^\circ$

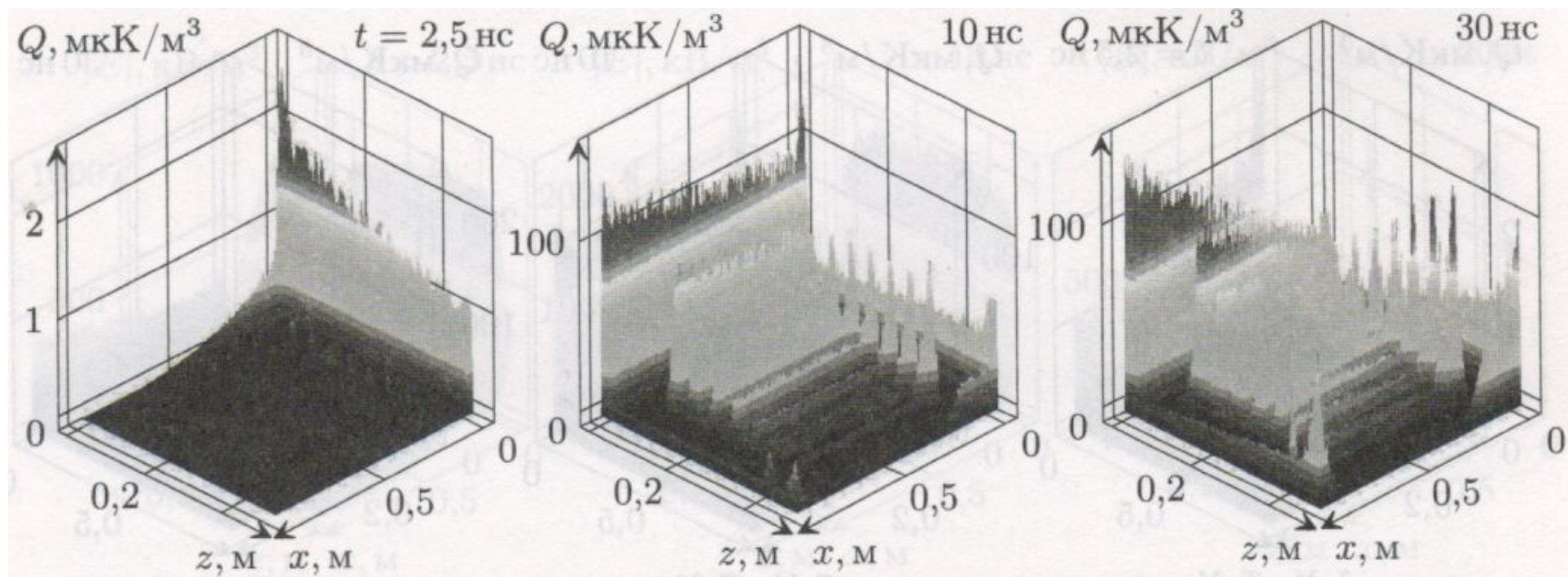
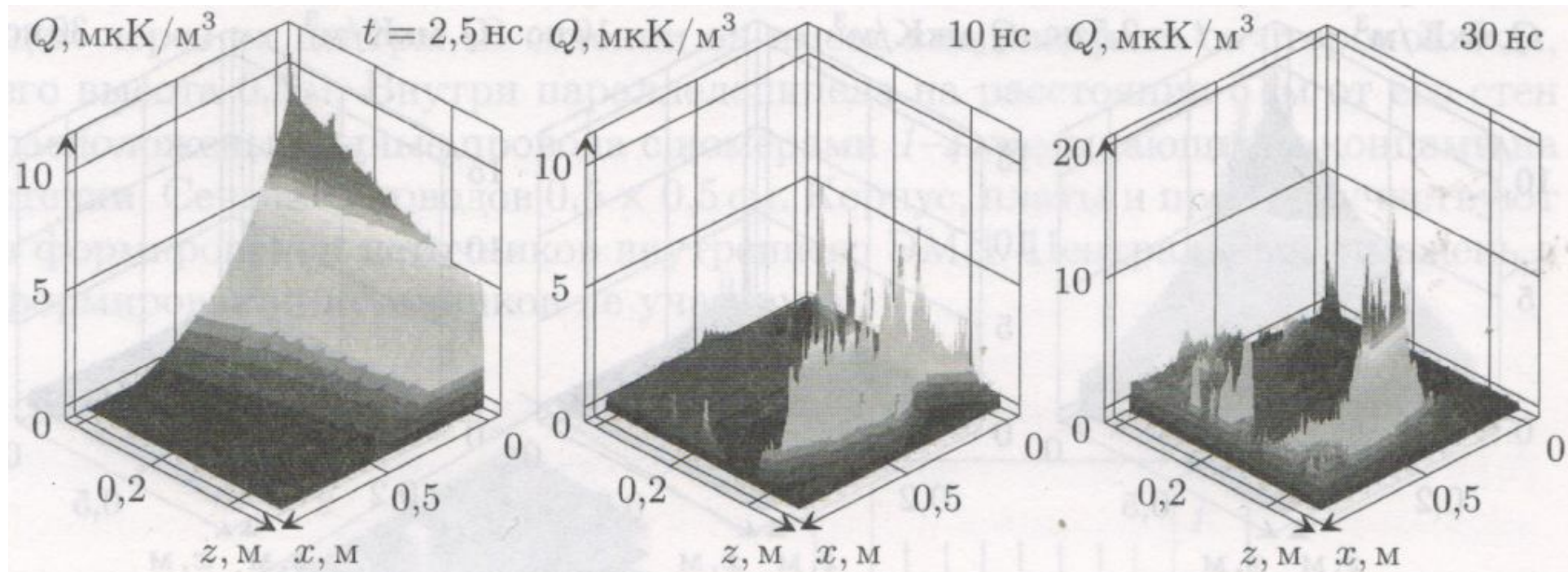
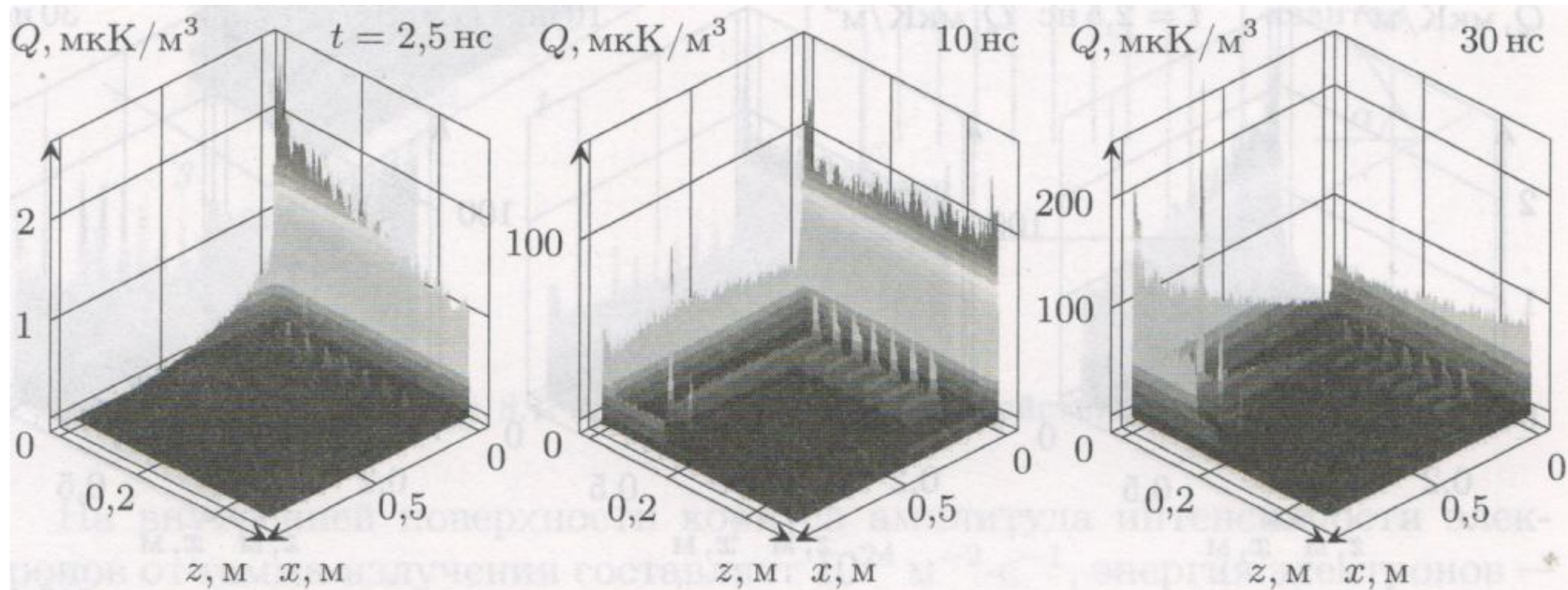


Рис. 3 Плотность заряда рентгеновских электронов при угле падения  $\alpha = 20^\circ$



Р и с. 4. Плотность заряда гамма-электронов при угле падения  $\alpha = 70^\circ$





Р и с. 5. Плотность заряда рентгеновских электронов при угле падения  $\alpha = 70^\circ$

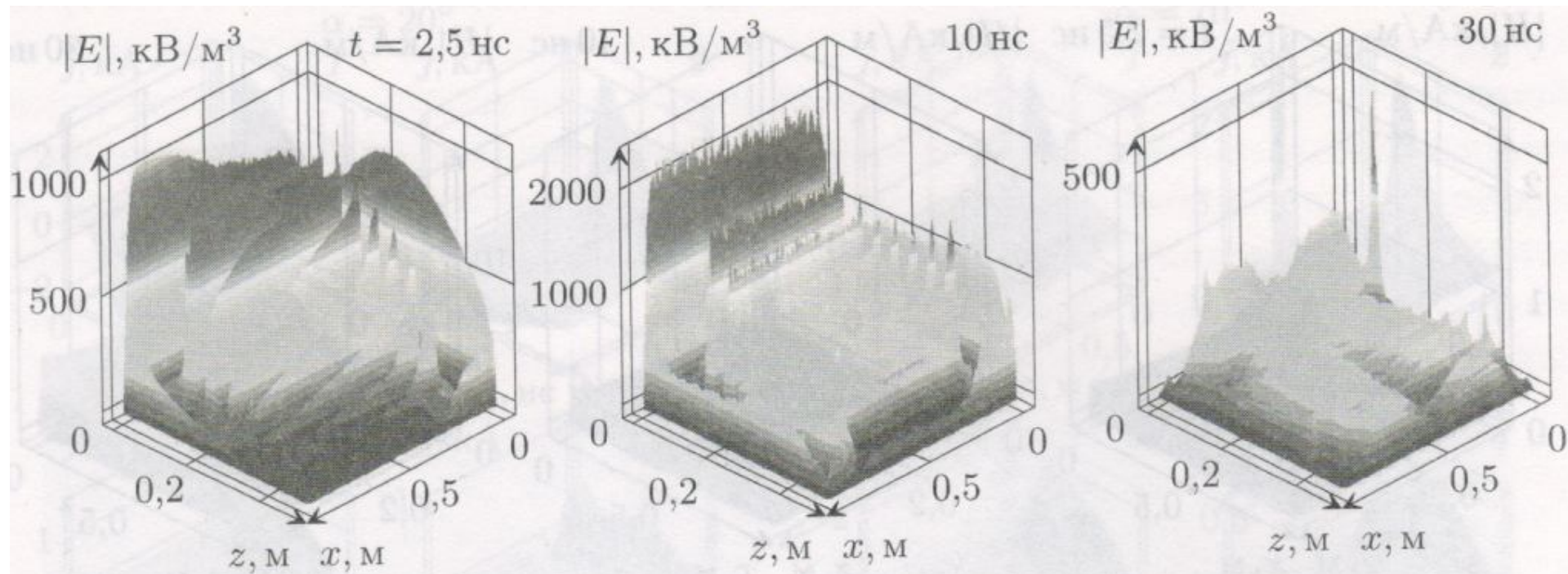


Рис. 6. Модуль электрического поля при угле падения  $\alpha = 20^\circ$

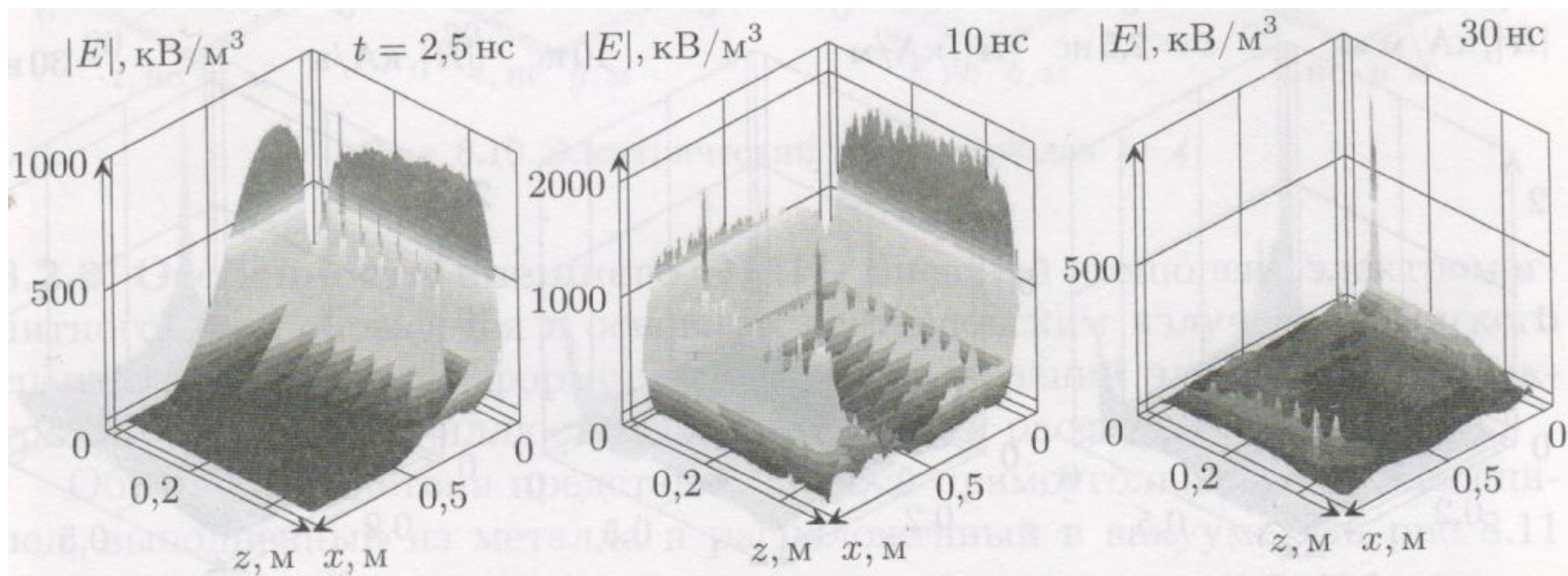
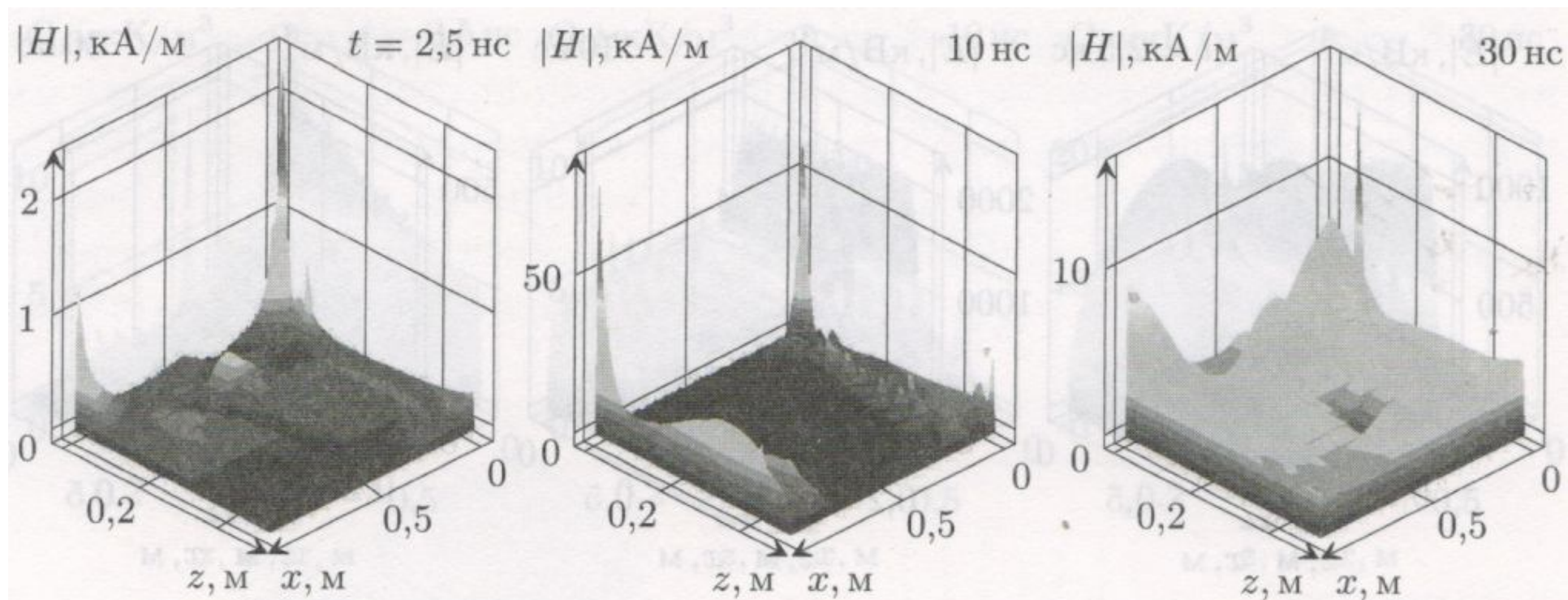
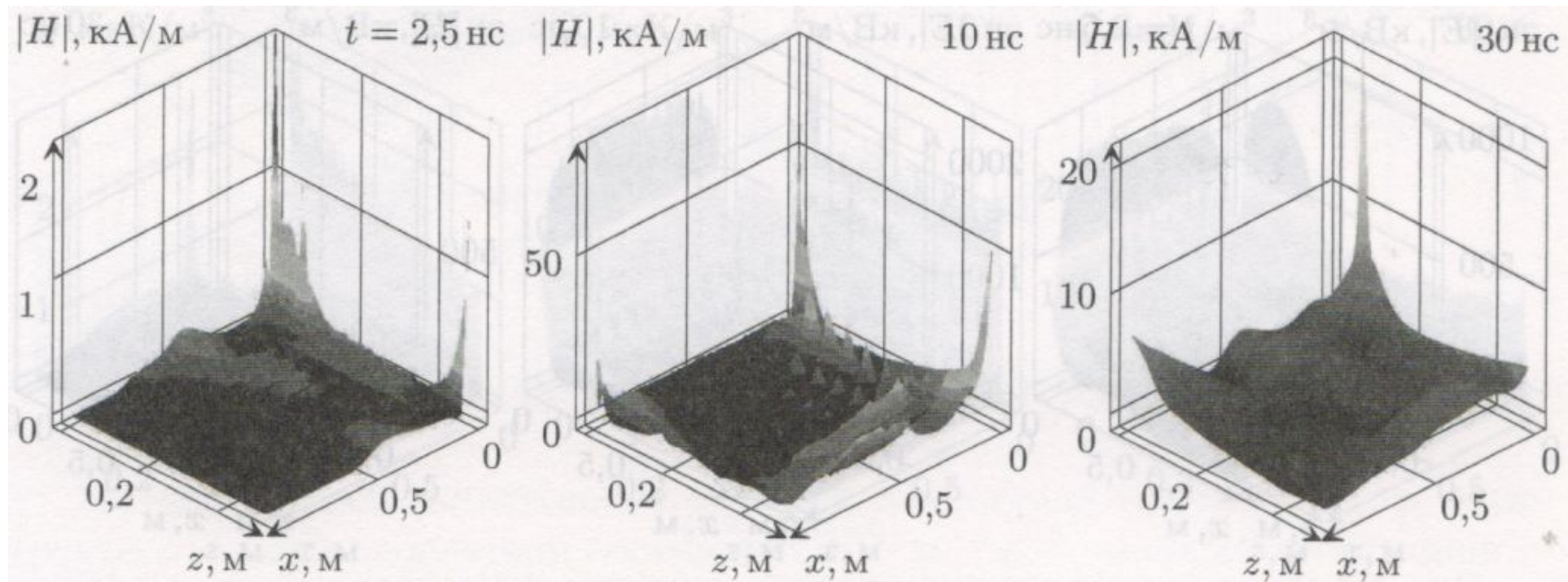


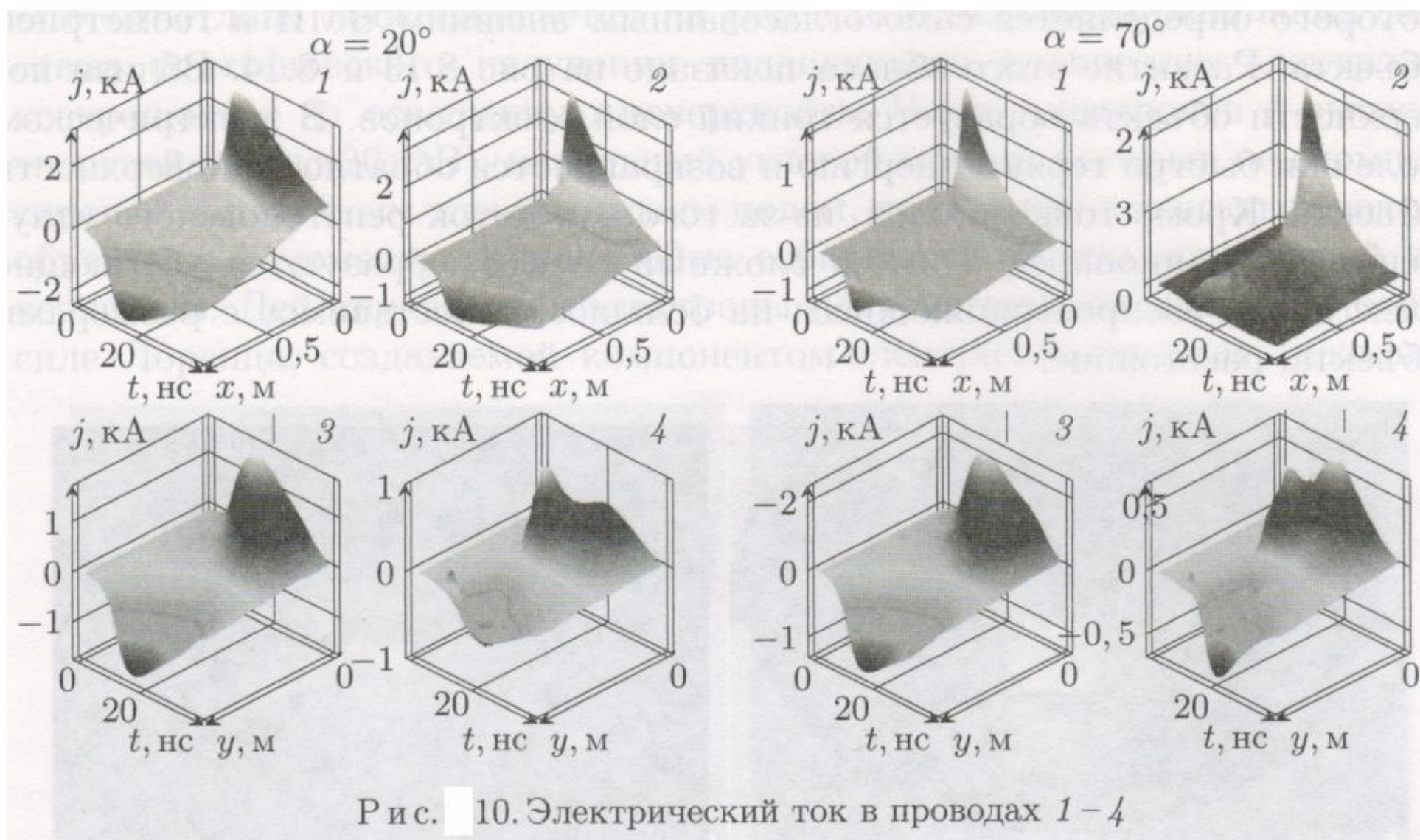
Рис. 7. Модуль электрического поля при угле падения  $\alpha = 70^\circ$



Р и с. 8. Модуль магнитного поля при угле падения  $\alpha = 20^\circ$



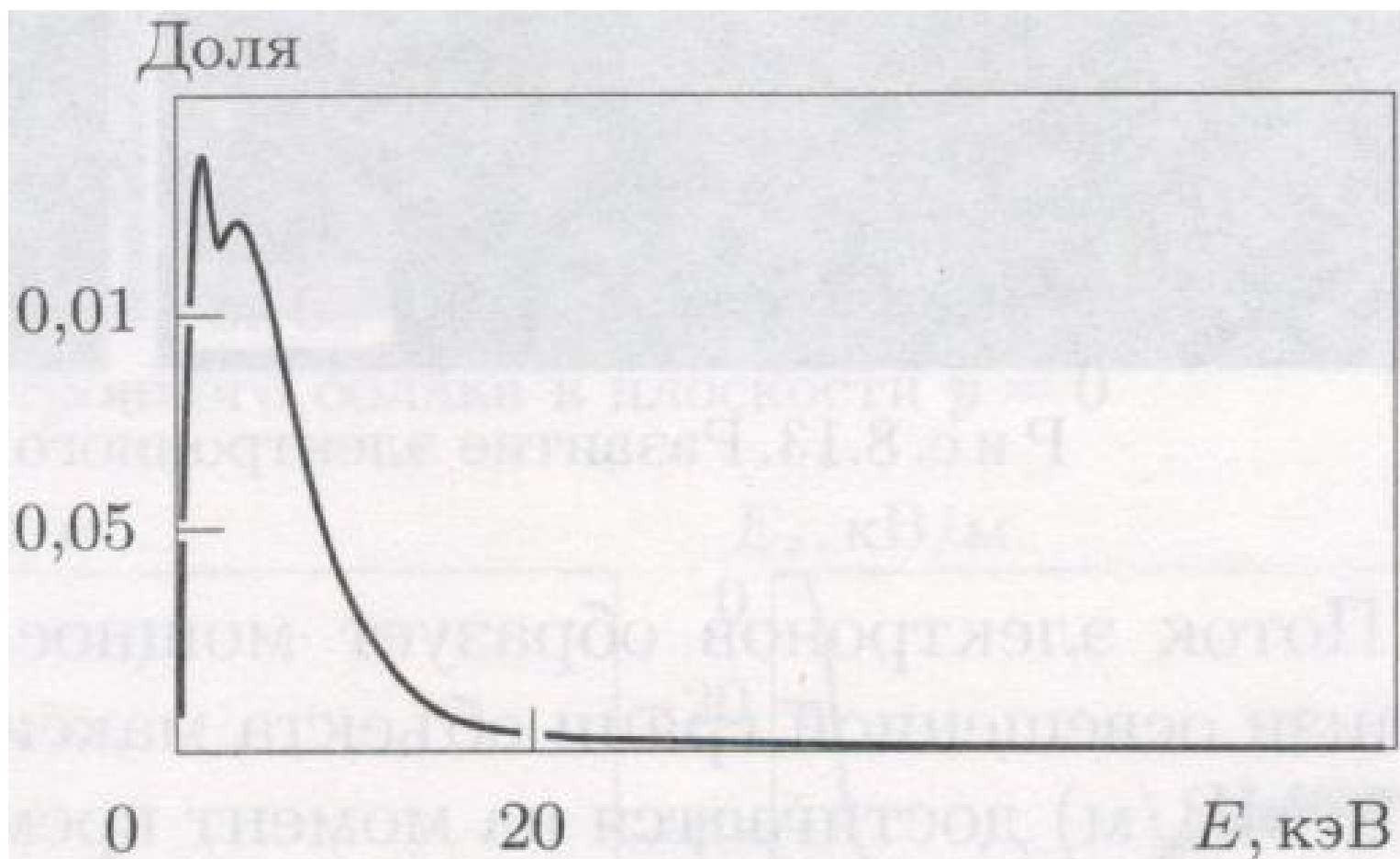
Р и с. 9. Модуль магнитного поля при угле падения  $\alpha = 70^\circ$



# Особенности формирования внешнего электромагнитного импульса [1]

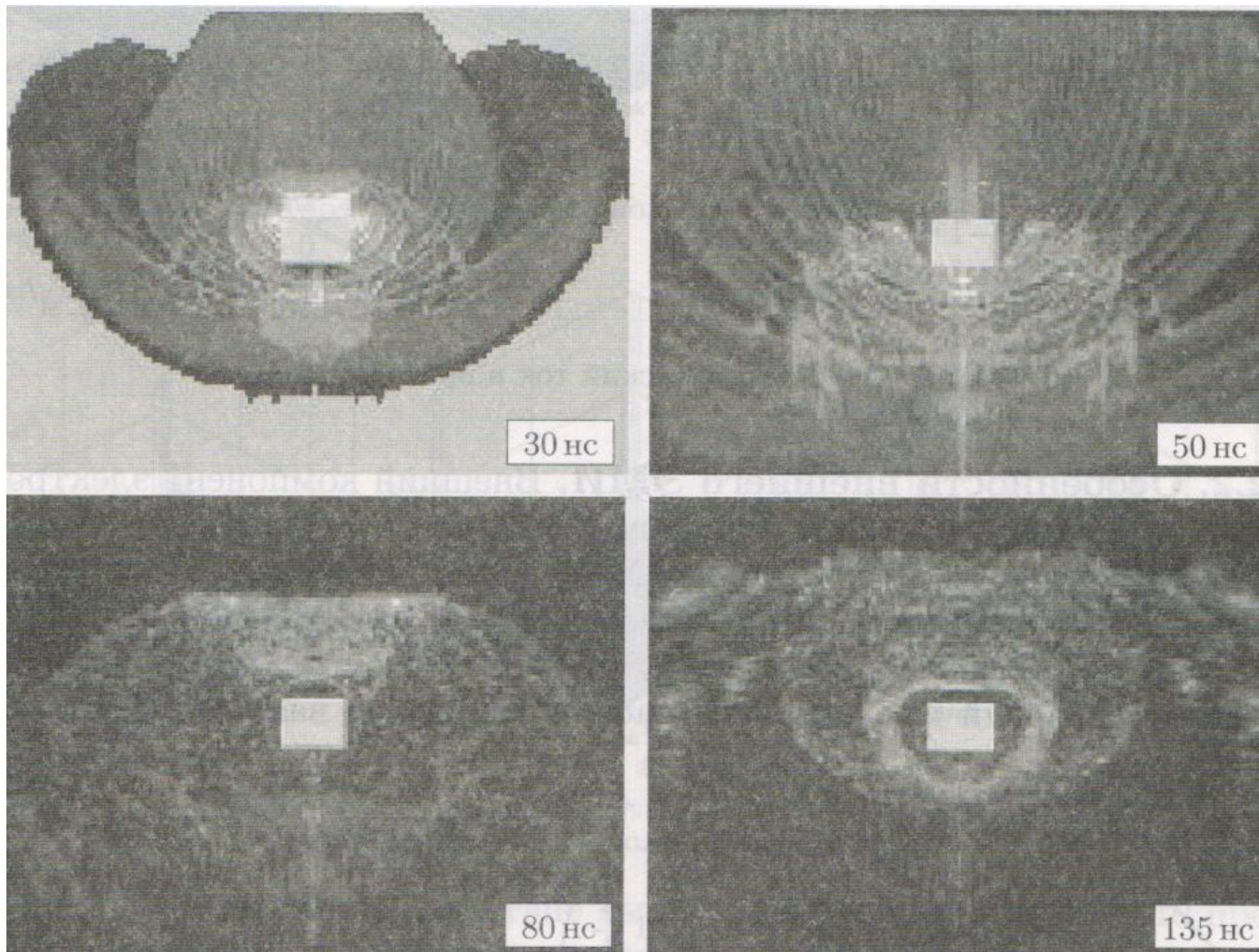


[1] Физика ядерного взрыва. Том 2. Действие взрыва. 12ЦНИИ МО РФ. 2010.



Р и с. 12. Спектр электронов





Р и с. 13. Развитие электронного облака в плоскости  $x = 0$

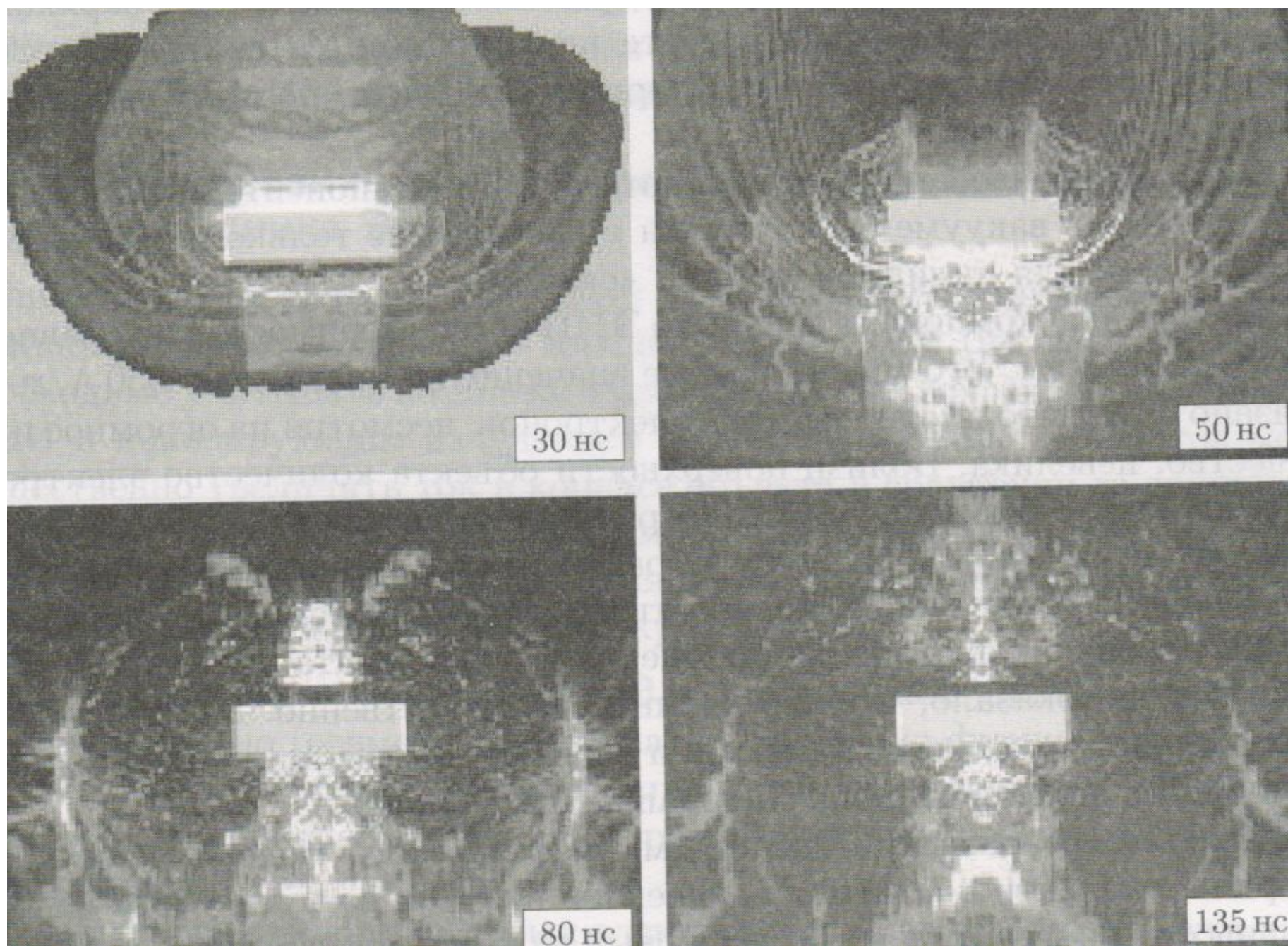


Рис. 14. Развитие электронного облака в плоскости  $y = 0$

# Типовая модель космического аппарата

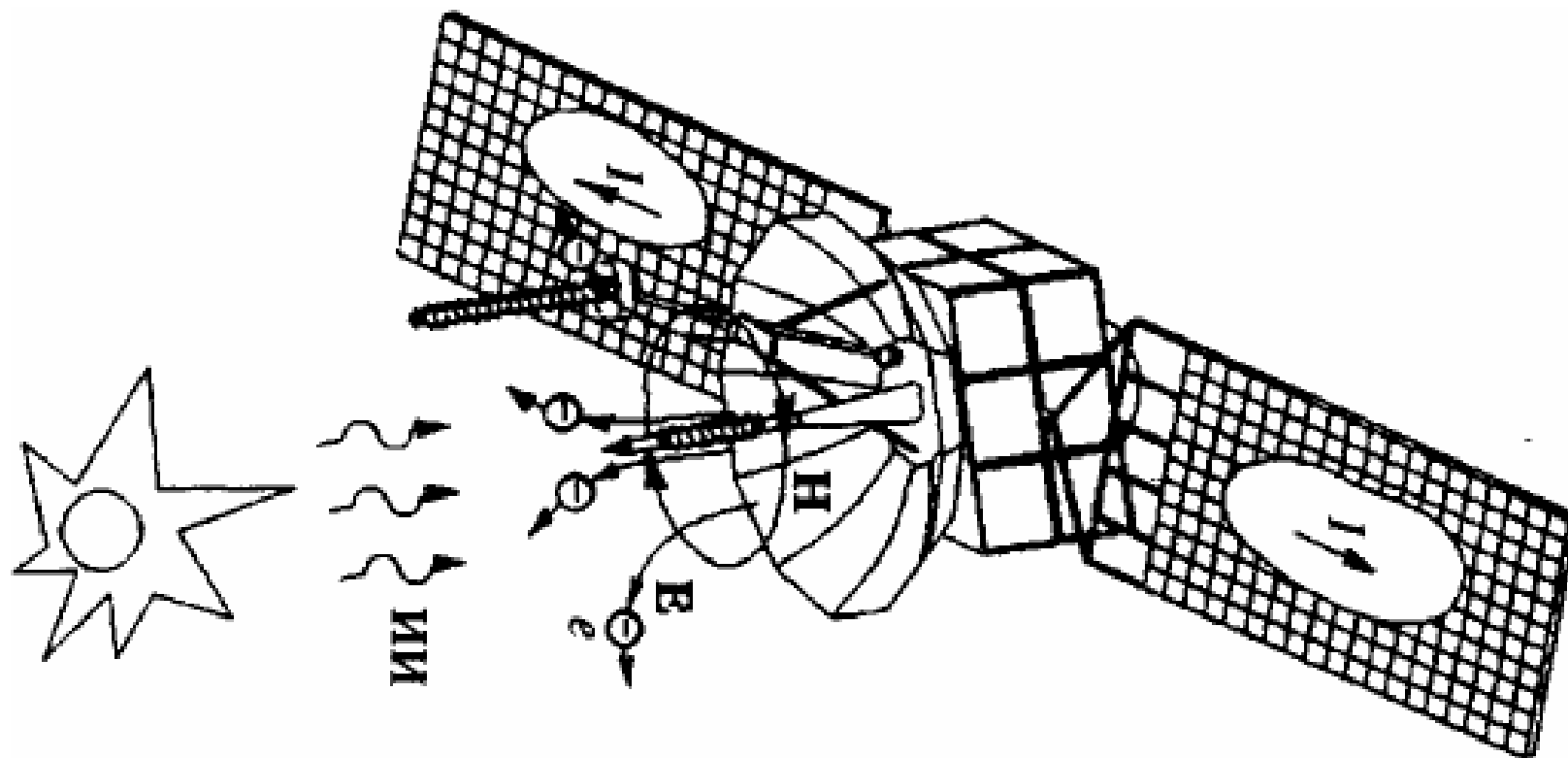


Рис. 15. Типовая модель космического аппарата (рисунок).

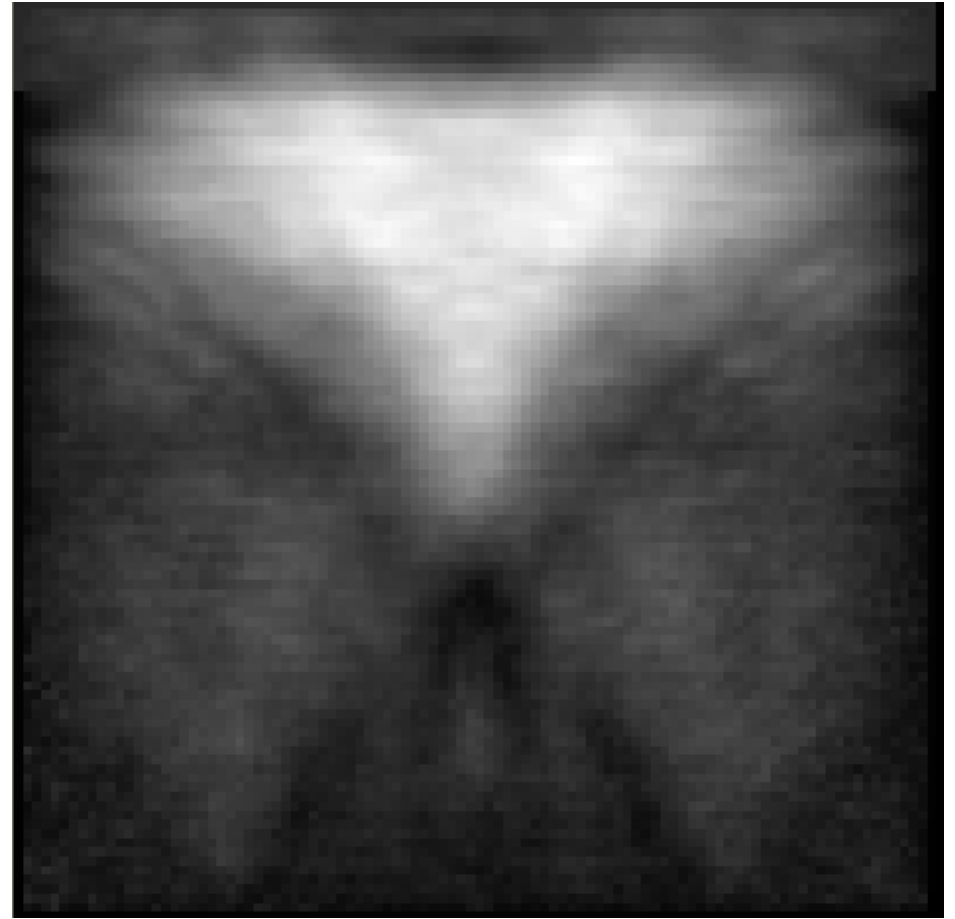
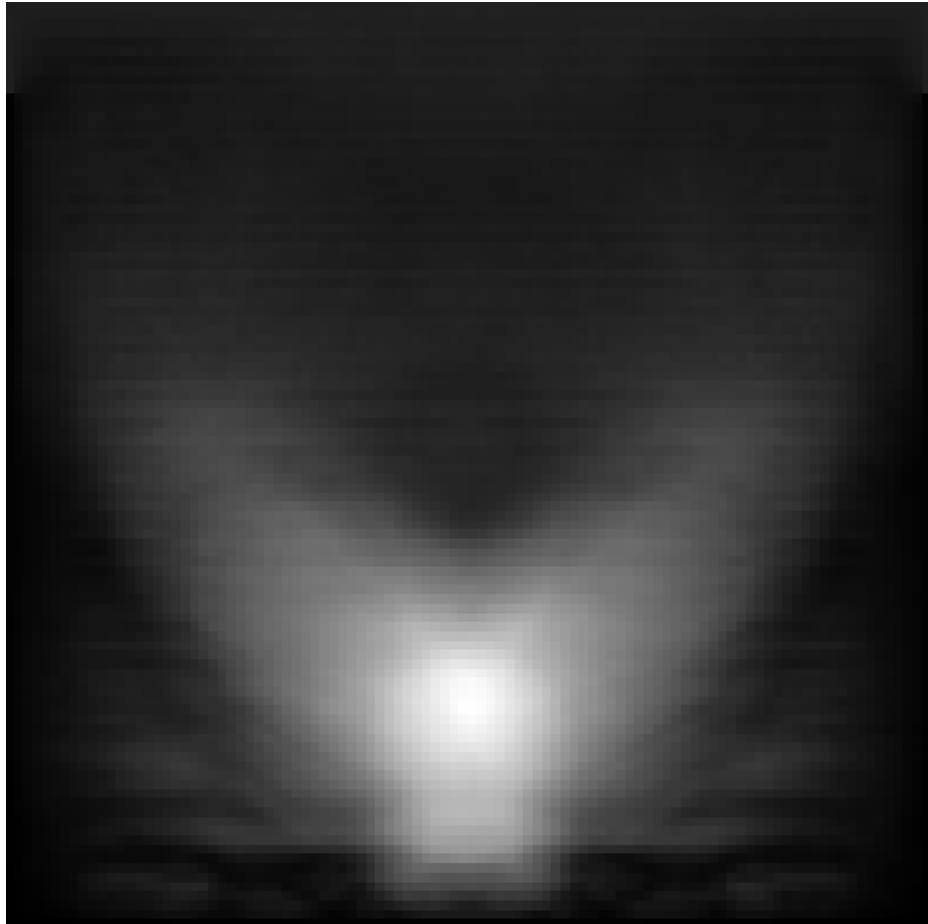


Рис. 16. Конфигурация электронного облака вокруг металлического корпуса в момент времени 40 и 70 нс при падении импульса по вертикали.

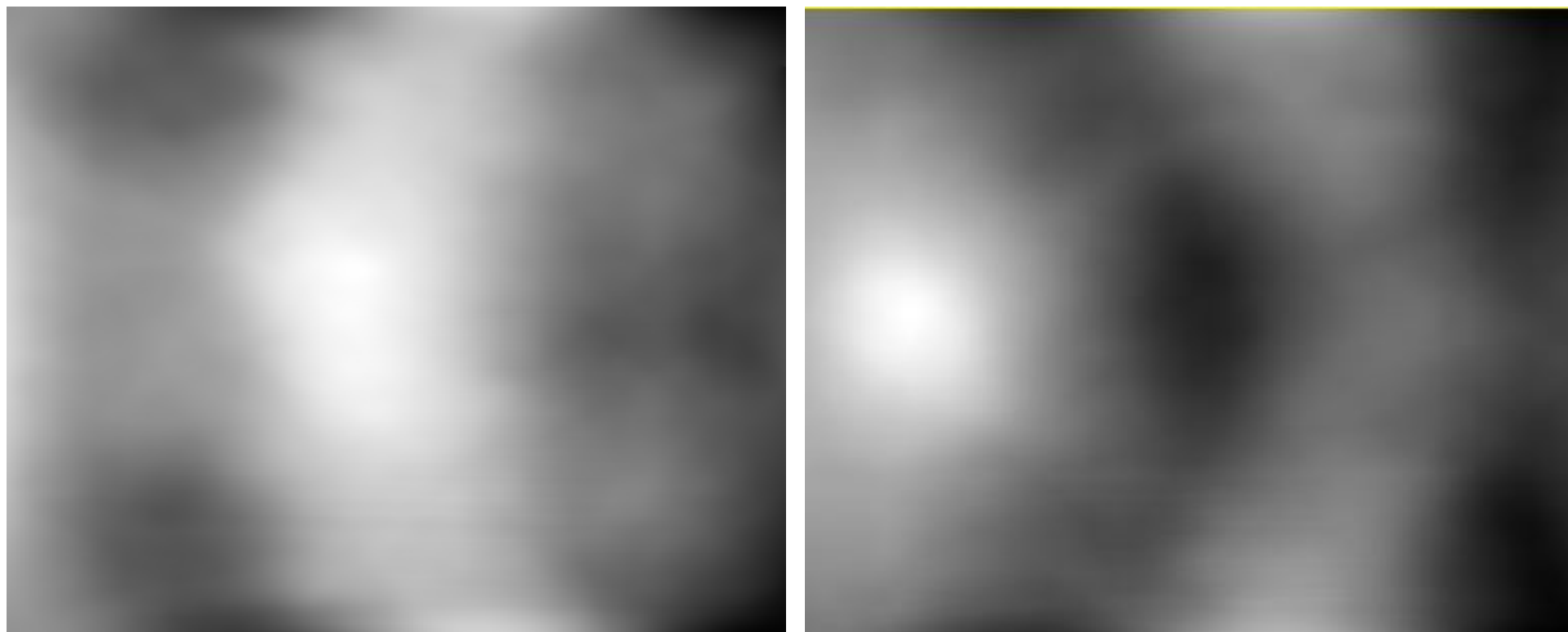


Рис. 17. Конфигурация электронного облака вокруг металлического корпуса в момент времени 40 и 70 нс при падении импульса излучения под углом 45 градусов к вертикали.

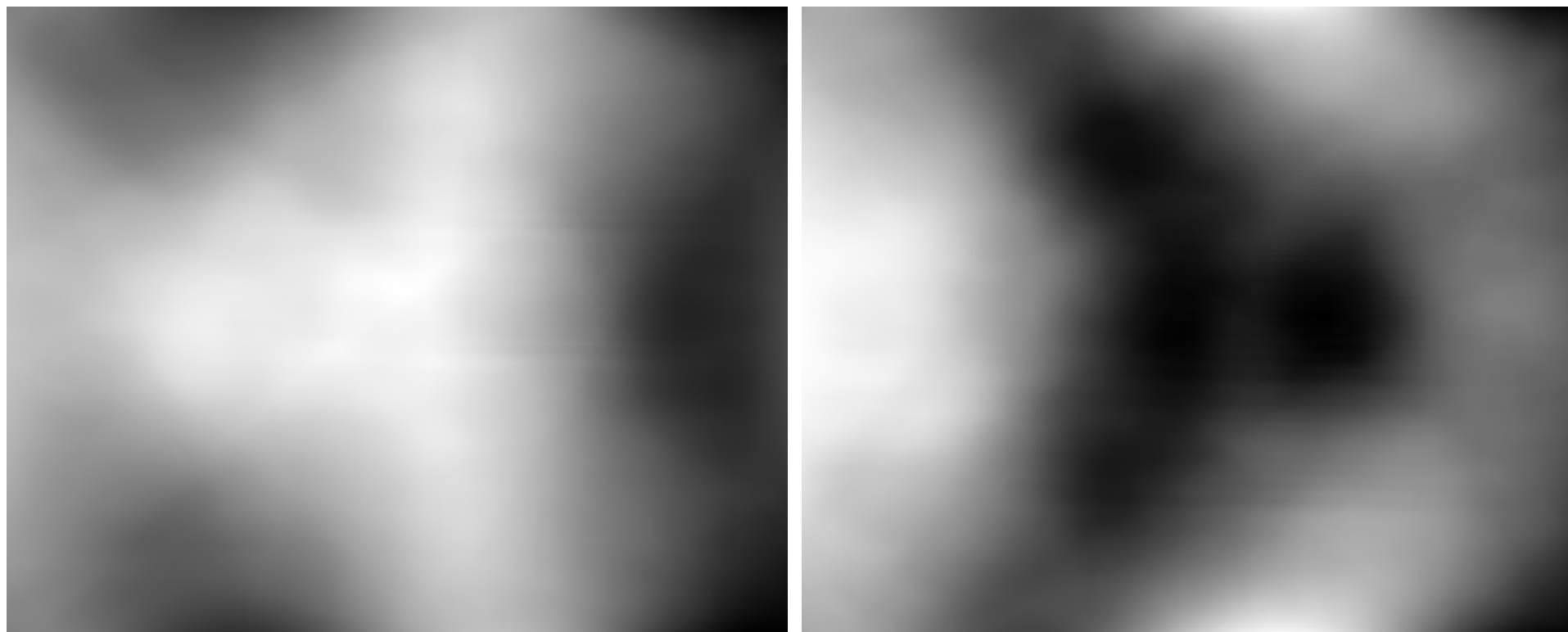


Рис. 18. Конфигурация электронного облака вокруг металлического корпуса в момент времени 40 и 70 нс при падении импульса излучения сбоку.

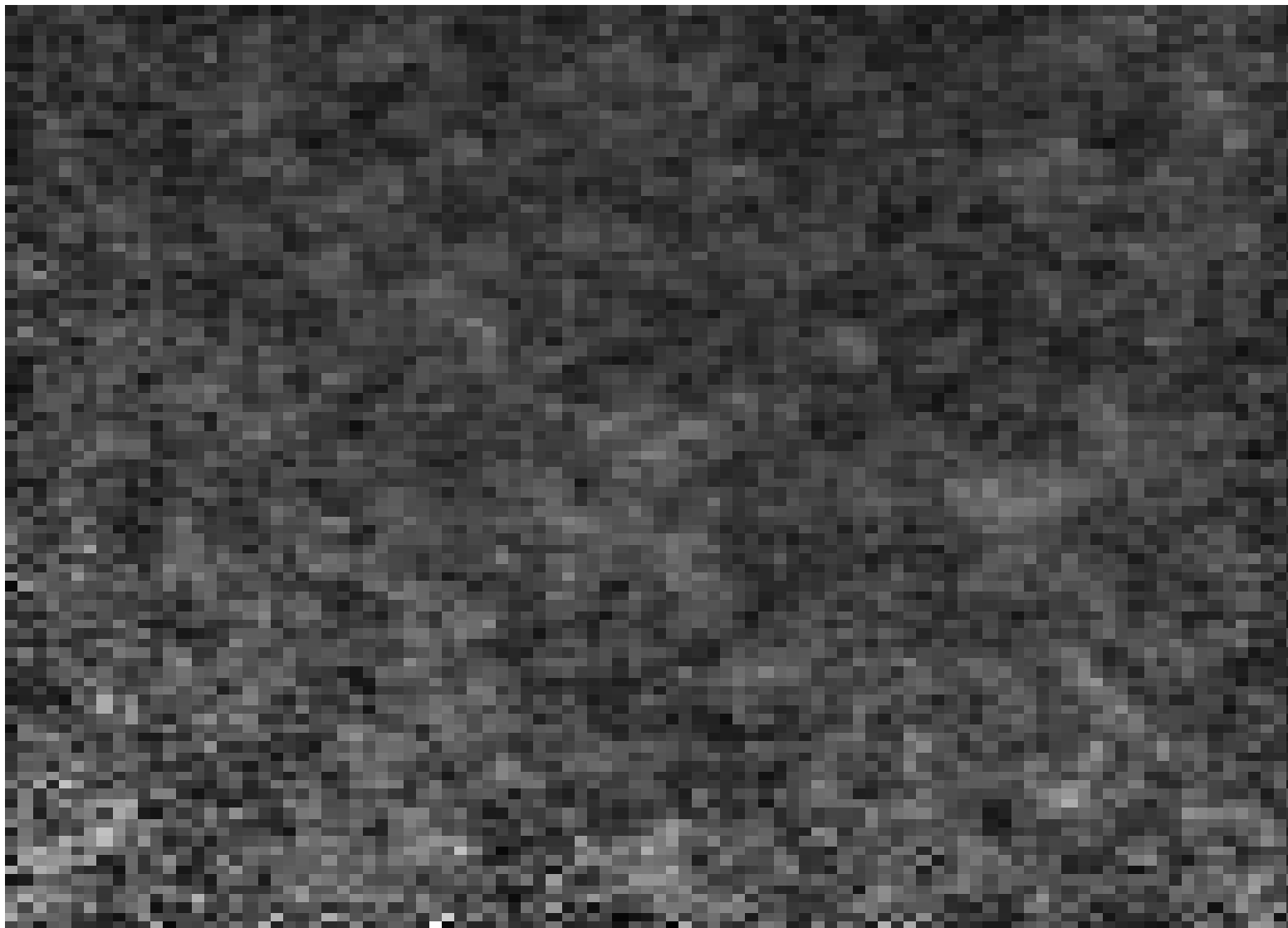


Рис. 19. Флуктуации плотности электрического заряда в области  $2 \times 2$  мкм в электронном облаке.

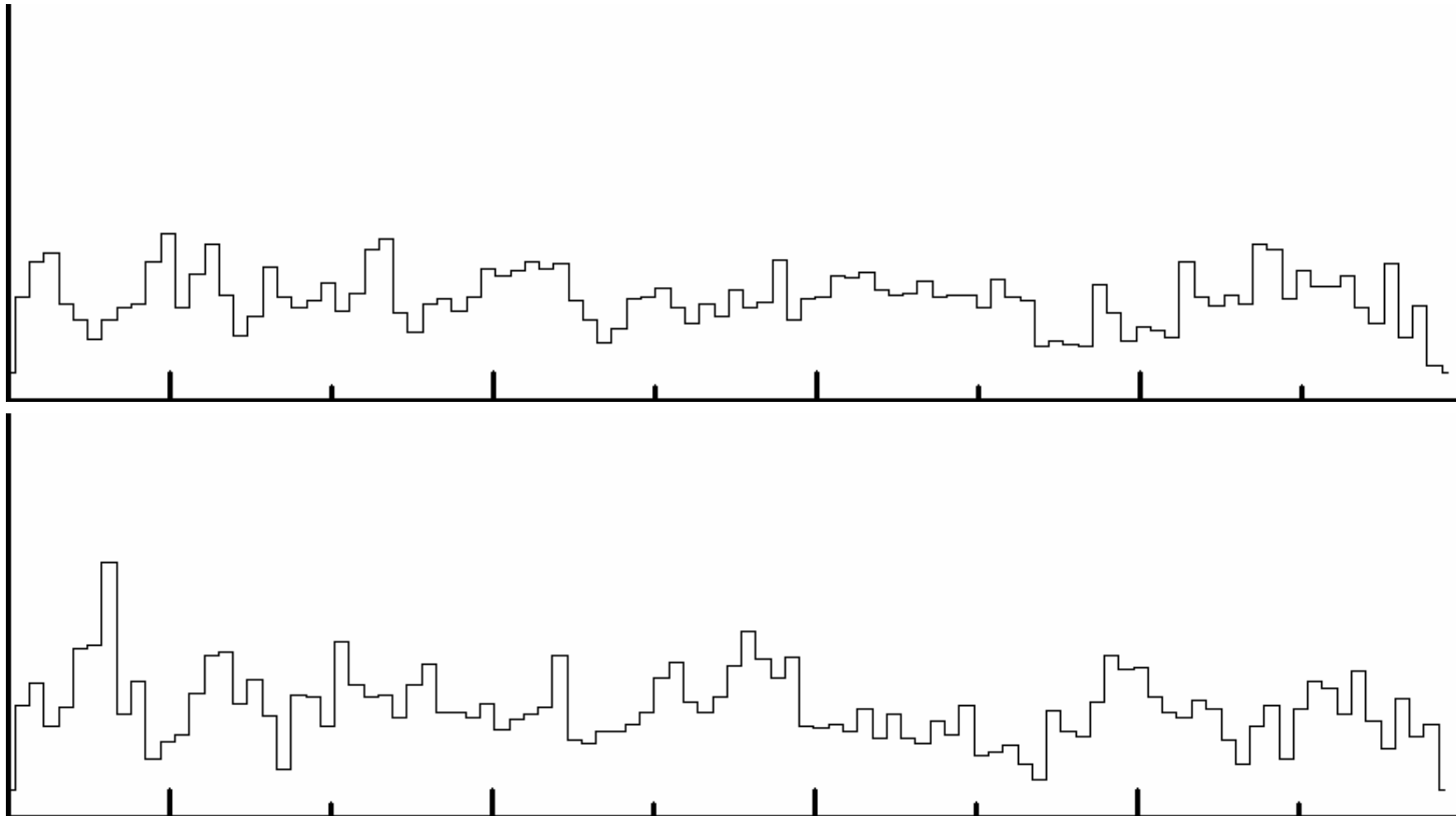


Рис. 19. Спектр шумов в некоторых проводящих элементах.



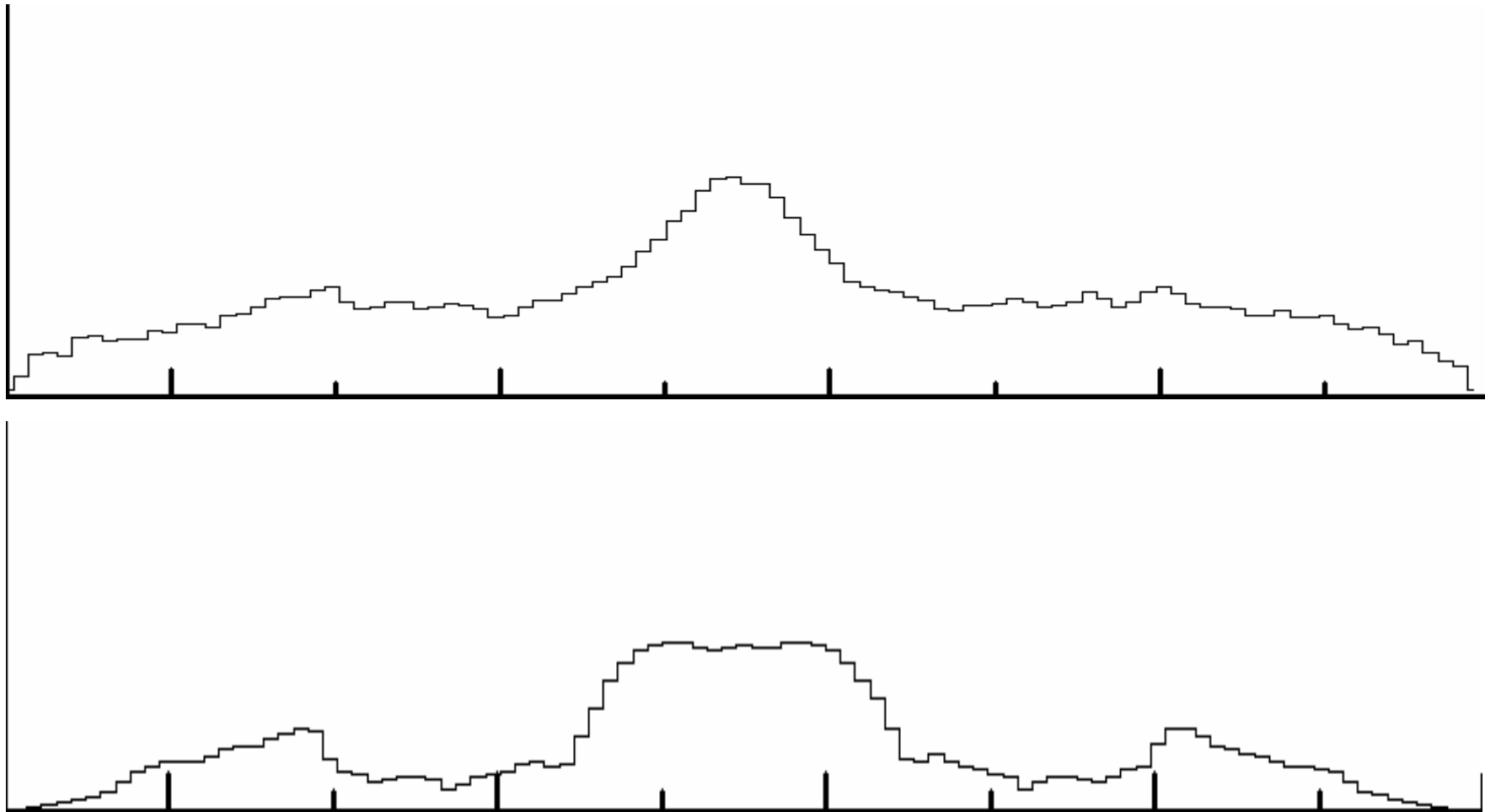


Рис. 20. Спектр шумов в некоторых проводящих элементах.

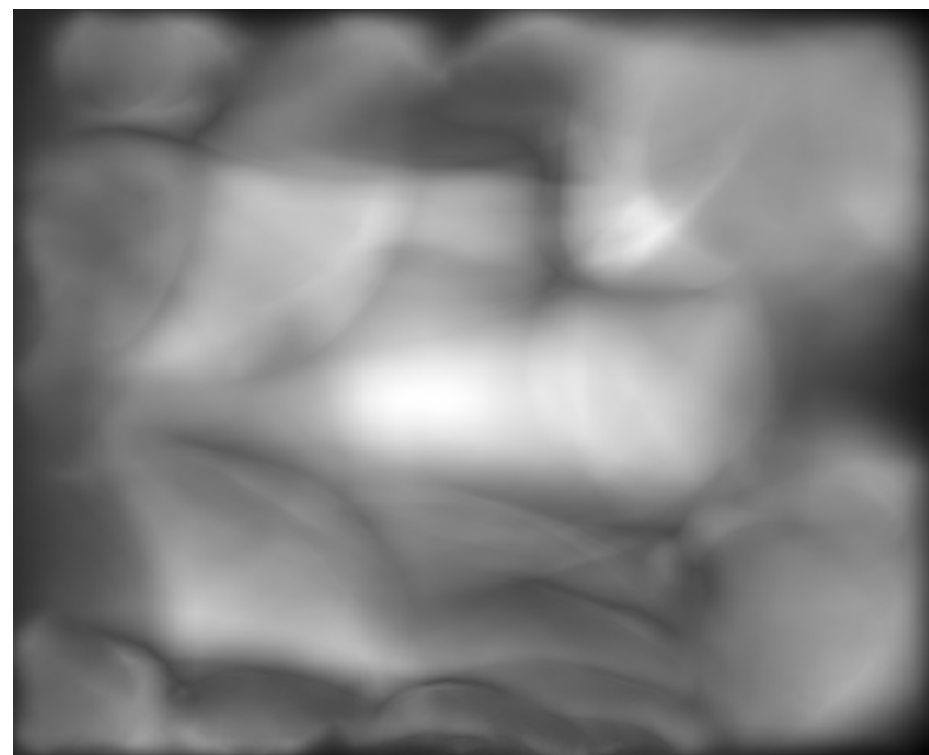


Рис. 21. Конфигурация электронного облака вокруг металлического корпуса несимметричной сложной формы в момент времени 40 и 70 нс.

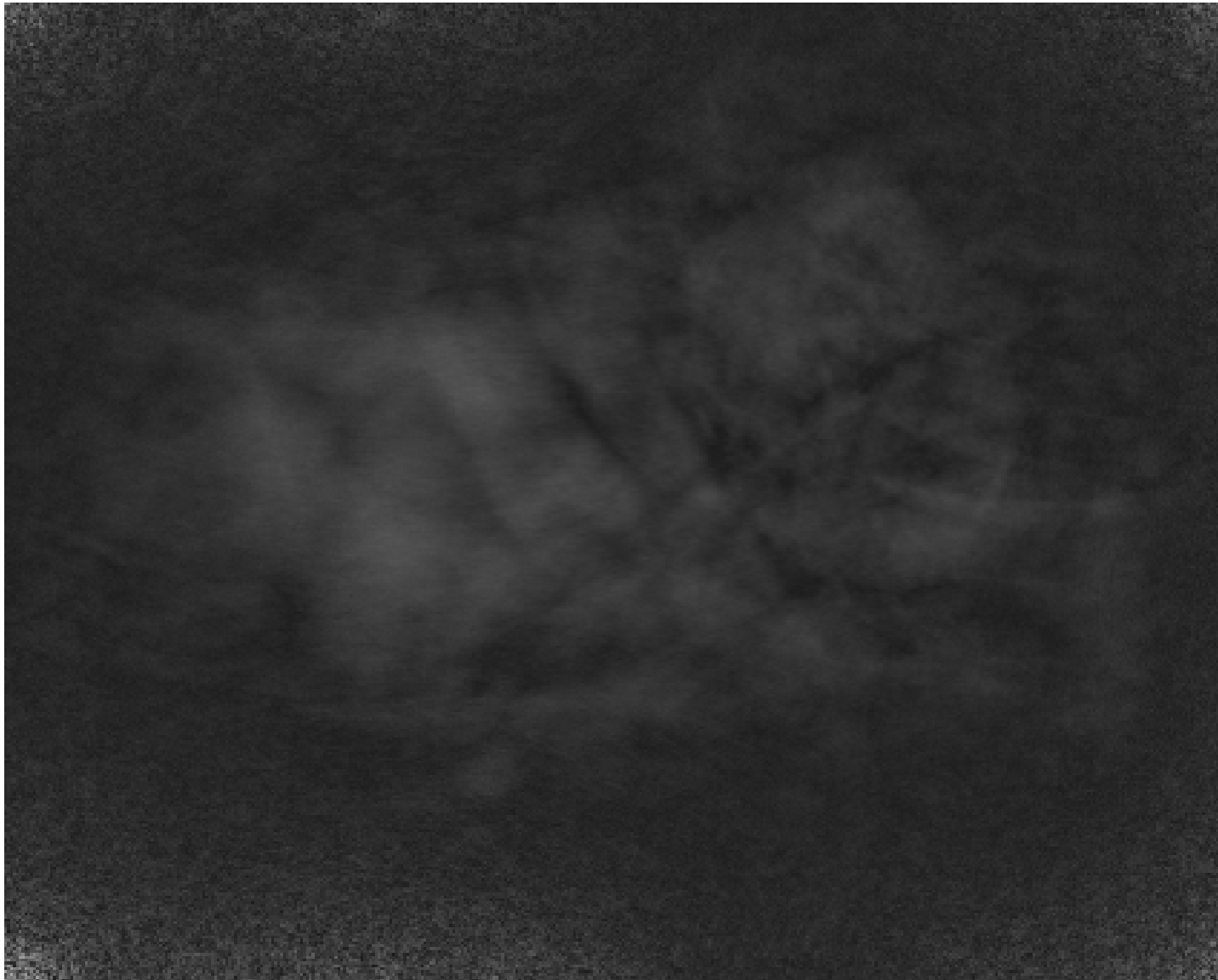


Рис. 22. Конфигурация электронного облака вокруг металлического корпуса несимметричной сложной формы в момент времени 120 нс в больших пространственных масштабах.

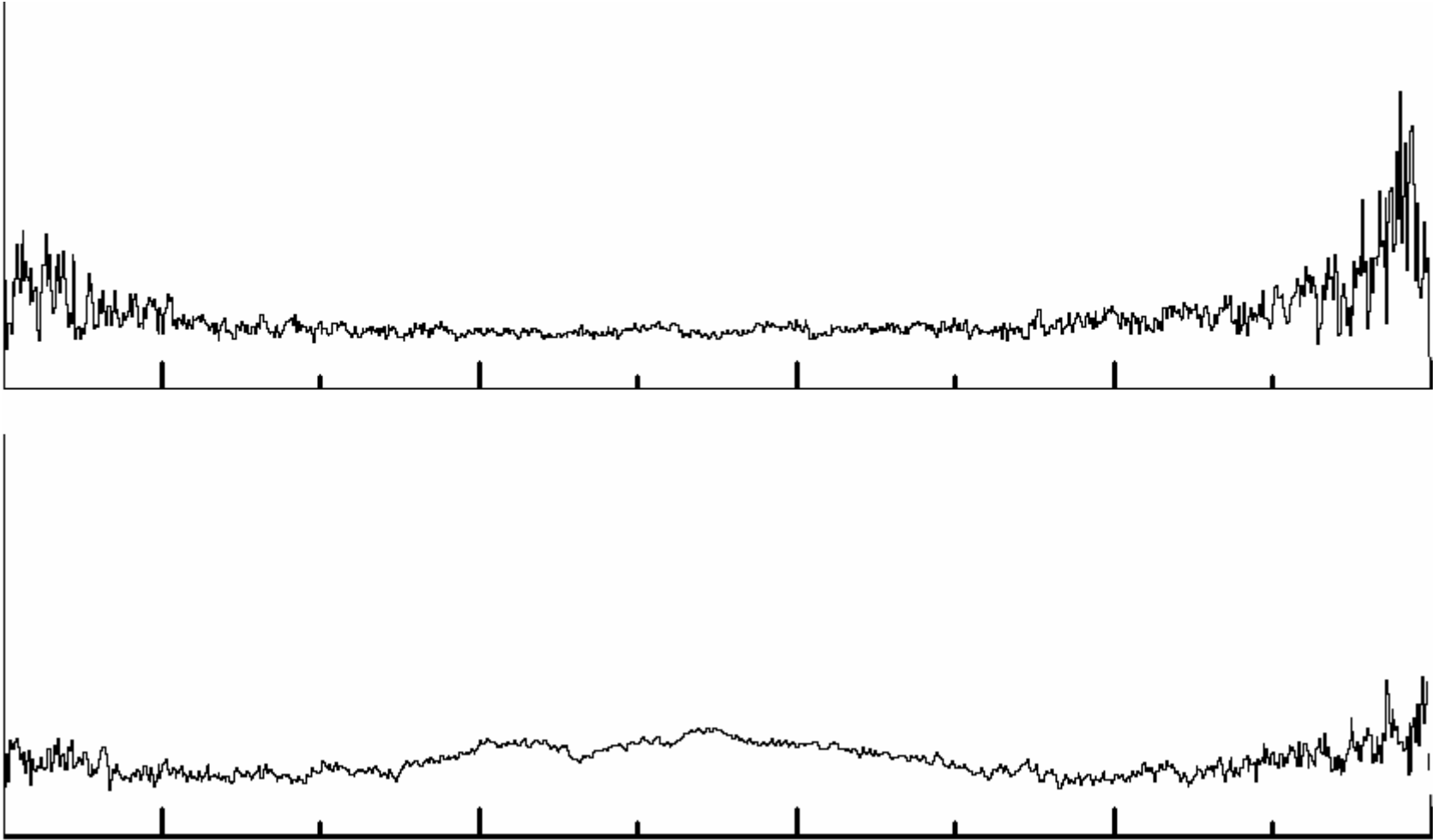


Рис. 23. Спектр шумов в некоторых проводящих элементах.

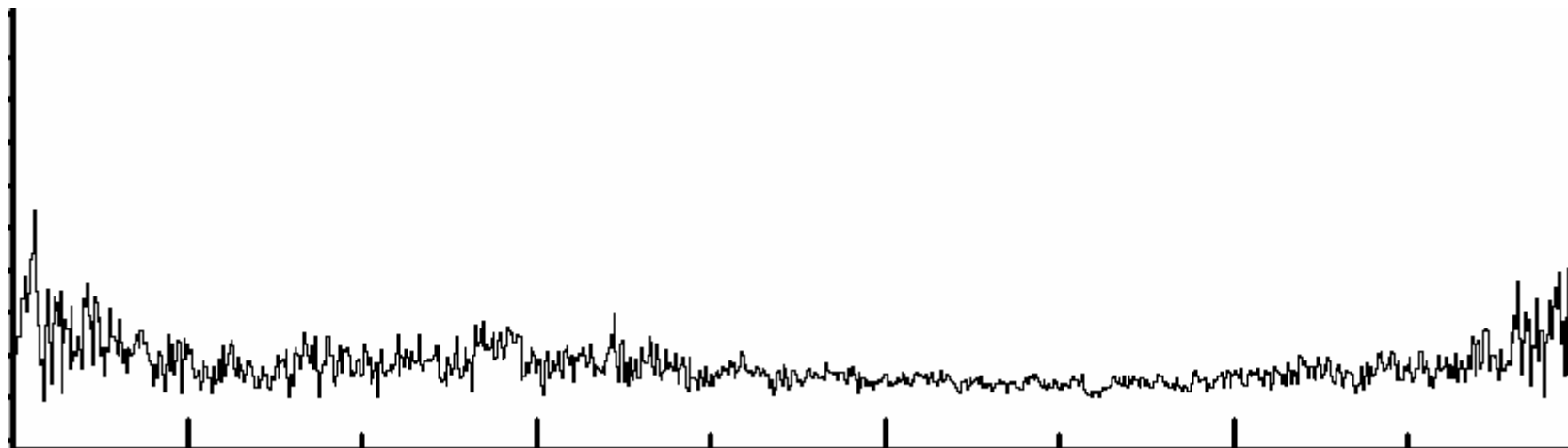


Рис. 24. Спектр шумов в некоторых проводящих элементах.

## **Выводы:**

- 1) Сделан обзор современных методов математического моделирования вторичных электромагнитных эффектов ядерного взрыва.
- 2) Приведены некоторые современные результаты, доступные в открытой литературе, расчётов вторичных электромагнитных эффектов ядерного взрыва.
- 3) Приведены результаты моделирования развития электронных облаков вокруг корпусов космических аппаратов и возникающих помех в электрических цепях, в условиях действия на них излучений высотного ядерного взрыва.