

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ
(ИММ)

УДК 629.735.33-4

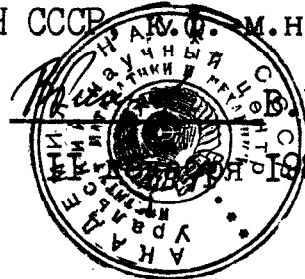
№ гос.регистрации 01880003467

Инв. №

0288.0 054701

УТВЕРЖДАЮ

Зам.директора Института
математики и механики УрО
АН СССР *К.Ф.М.Н.*



В.М.РЕШЕТОВ
1987 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Разработка численных методов построения экстремальных
ветровых возмущений, действующих на самолет на этапе посадки

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ПОСТРОЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ
ВЕТРОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

(промежуточный)

Зав.отделом
динамических систем
доктор физ.-мат.наук

А.И.СУББОТИН

Зав.сектором
кандидат физ.-мат.наук

В.С.ПАЦКО

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Ответственные исполнители

| | | | | |
|-----------------------------|--------------------|----------|-------------|--|
| Зав. сектором, к.ф.-м.н. | <i>В.С. Пацко</i> | 11.12.87 | В.С. ПАЦКО | (Введение, реферат, разделы 2,3, заключение) |
| Научн. сотр., к.ф.-м.н. | <i>Н.Д. Боткин</i> | 11.12.87 | Н.Д. БОТКИН | (Разработка набора программ моделиро- вания, раздел 2) |
| Мл. научн. сотр. | <i>В.Л. Турова</i> | 11.12.87 | В.Л. ТУРОВА | (Моделирование на ЭВМ, разделы 1,3) |

Р Е Ф Е Р А Т

Отчёт 58 стр., 31 рисунок, 12 источников
СДВИГ ВЕТРА, МИКРОВЗРЫВ, ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ ВЕТРОВОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ,
ЗАДАЧА ПОСАДКИ, ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ИГРА, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ.

Исследуется задача посадки самолёта в условиях ветрового возмущения, обусловленного микровзрывом.

Цель работы - создание на ЭВМ программы микровзрыва, стыковка её с комплексом программ моделирования процесса посадки.

Разработана программа микровзрыва, проведено моделирование процесса посадки для различных вариантов расположения центра микровзрыва относительно глиссады снижения и при нескольких вариантах параметров микровзрыва. Использовались два способа управления: традиционный и минимаксный (игровой), основанный на методах теории дифференциальных игр.

Полученные результаты могут быть полезны при совершенствовании комплексных самолётных тренажёров, а также при испытании новых методов автоматической посадки.

СОДЕРЖАНИЕ

| | стр. |
|--|------|
| Перечень условных обозначений и символов | 5 |
| В в е д е н и е | 6 |
| I. Модель микровзрыва | 8 |
| I.1. Расчетные формулы | 8 |
| I.2. Описание программы | 12 |
| 2. Действующий способ управления | 14 |
| 2.1. Формирование $\delta_{нз}$ | 14 |
| 2.2. Формирование $\delta_{рз}$ | 15 |
| 2.3. Формирование $\delta_{эз}$ | 17 |
| 2.4. Формирование $\delta_{вз}$ | 19 |
| 3. Результаты моделирования | 22 |
| З а к л ю ч е н и е | 54 |
| Список использованных источников | 55 |
| Приложение (текст программы) | 57 |

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СИМВОЛОВ

ВПП - взлетно-посадочная полоса,

x_g, y_g, z_g - земная нормальная система координат,

$W_{x_g}, W_{y_g}, W_{z_g}$ - составляющие скорости ветра по осям

x_g, y_g, z_g ,

θ - угол тангажа,

ψ - угол рыскания,

γ - угол крена,

α - угол атаки,

β - угол скольжения,

P - сила тяги,

V - модуль воздушной скорости,

$V_{x_g}, V_{y_g}, V_{z_g}$ - проекции вектора воздушной скорости на

оси x_g, y_g, z_g ,

m - масса самолета,

δ_H - отклонение руля направления,

δ_ε - отклонение элеронов,

δ_B - отклонение руля высоты,

δ_P - положение органа управления силой тяги.

В В Е Д Е Н И Е

Отчет является непосредственным продолжением работы /I/. Как и в /I/, рассматривается задача посадки самолета. В /I/ основное внимание было уделено вопросу имитации экстремальных ветровых возмущений при помощи методов теории дифференциальных игр /2/. В этом отчете изучается действие сдвига ветра, вызванного локализованным в пространстве явлением микровзрыва /3-6/.

Микровзрыв образуется за счет нисходящего потока воздуха, который ударяется о поверхность земли и растекается затем с образованием вихря. При прохождении самолетом на взлете или посадке зоны микровзрыва происходит резкое изменение скорости ветра. Традиционные способы управления не справляются с таким возмущением. В связи с этим в настоящее время делаются попытки построить новые способы управления /7-12/.

Используемая в отчете модель микровзрыва взята из статьи /3/. Микровзрыв задается тремя параметрами: скорость ветра в центральной части, высота центральной части, радиус вихря. Для конкретизации расположения микровзрыва относительно глиссады снижения следует выбрать координаты центра микровзрыва по осям x_g , z_g земной нормальной системы координат. Ось x_g направлена по оси взлетно-посадочной полосы (ВПП), ось z_g ортогональна к ней в плоскости земли, ось y_g лежит в вертикальной плоскости.

Расчетные формулы и программа микровзрыва приведены в разделе I. Текст программы помещен в приложении. Программа разработана студентами Уральского госуниверситета им. А.М.Горького А.Г.Ивановым и Е.А.Рязанцевой.

Во втором разделе выписаны соотношения, определяющие дейст-

вующий (принятый в настоящее время) способ управления самолетом на посадке. Действующий способ, наряду с минимаксным (игровым), использовался при моделировании процесса посадки. Игровой способ описан в /1/.

Раздел 3 посвящен результатам моделирования процесса посадки при наличии микровзрыва. В проведении расчетов участвовала техник отдела динамических систем ИММ Э.Е.Тарасьева.

Работа выполнена в соответствии с договором № I8-86-2 от I5.08.86 на проведение научно-исследовательской работы между Институтом математики и механики УрО АН СССР и Ордена Ленина Академией гражданской авиации.

І. МОДЕЛЬ МИКРОВЗРЫВА

І.І. Расчетные формулы

Математическая модель микровзрыва взята из статьи /3/. Стационарная стадия микровзрыва идеализируется в виде трехмерного осесимметричного вихревого поля, в котором выделяется тороидальная область ("ядро"), где скорость, начиная от нулевой в центре, линейно увеличивается по радиусу до границы ядра. Вне ядра вихревое поле задается функцией потока через приближенно вычисляемые комбинации полных эллиптических интегралов. Численное дифференцирование функции потока дает радиальную и вертикальную составляющие скорости ветра. Первая из них затем раскладывается на две компоненты: параллельно и перпендикулярно оси ВПП.

Параметры микровзрыва (рис.І.І):

VO - скорость в центральной части микровзрыва, $[м/с]$,

HO - высота центральной части, $[м]$,

RO - радиус вихря, $[м]$.

Радиус RC ядра вихря полагается равным $0.8 HO$.

Геометрическое положение микровзрыва определяется координатами его центра в горизонтальной плоскости. При расчете скорости ветра в заданной точке e используются величины (рис.І.2):

Y - высота точки e ,

R - расстояние от точки e до центральной оси микровзрыва,

r_1 - минимальное расстояние от точки e до основного кольца вихря,

r_2 - минимальное расстояние от точки e до зеркального кольца вихря,

Параметры микровзрыва

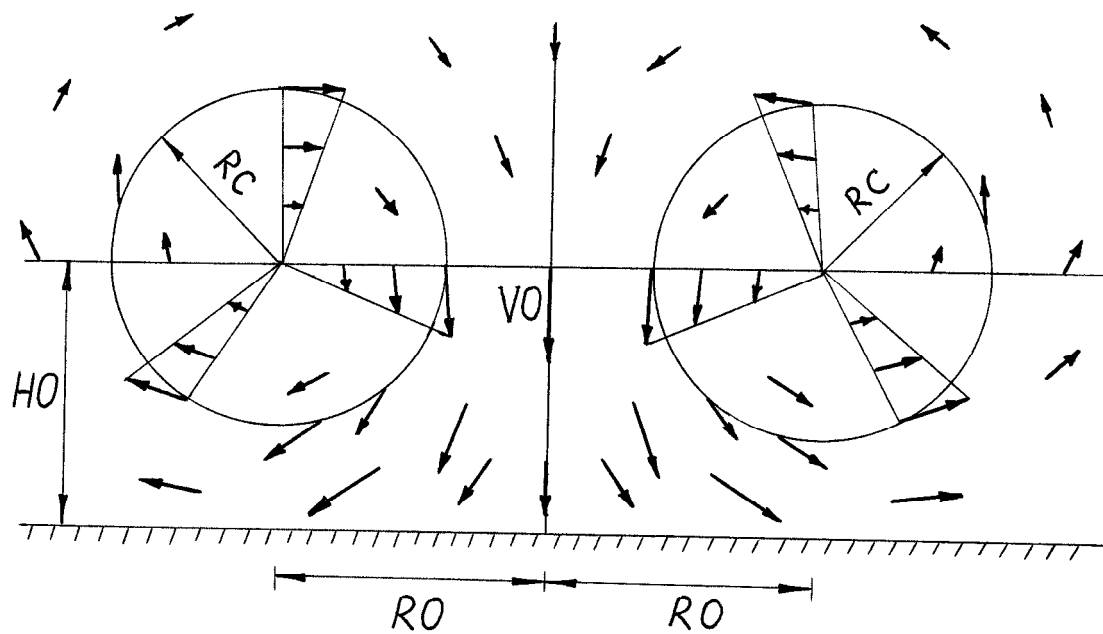


Рис. I. I

Основное и зеркальное кольца вихря

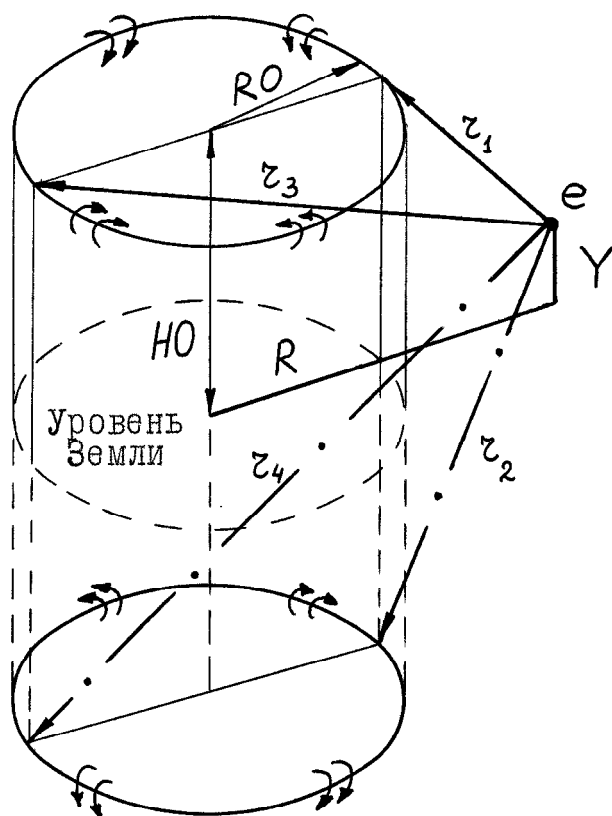


Рис. I. 2

- r_3 - максимальное расстояние от точки e до основного кольца вихря,
 r_4 - максимальное расстояние от точки e до зеркального кольца вихря

Кроме того:

- k_1 - модуль эллиптических интегралов основного вихря,
 k_2 - модуль эллиптических интегралов зеркального вихря,
 a_p - аппроксимация комбинации эллиптических интегралов основного вихря,
 a_m - аппроксимация комбинации эллиптических интегралов зеркального вихря,
 STR - функция потока,
 CIR - циркуляционная сила вихря,
 WR - радиальная скорость ветра в точке e ,
 WY - вертикальная скорость ветра в точке e ,
 WX, WZ - разложение радиальной скорости параллельно и перпендикулярно оси $WIII$.

Приведем последовательность расчетных формул. Циркуляционная сила CIR связана с VO , HO , RO соотношением

$$CIR = \frac{2VO \cdot RO}{\left[1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{2HO}{RO} \right)^2 \right]^{1.5}} \right]}$$

Расстояния r_i :

$$r_1 = \sqrt{(Y - HO)^2 + (R - RO)^2}, \quad r_2 = \sqrt{(Y + HO)^2 + (R - RO)^2}$$

$$r_3 = \sqrt{(Y - HO)^2 + (R + RO)^2}, \quad r_4 = \sqrt{(Y + HO)^2 + (R + RO)^2}.$$

Далее:

$$k_1 = \frac{r_3 - r_1}{r_3 + r_1}, \quad k_2 = \frac{r_4 - r_2}{r_4 + r_2}$$

$$a_p = \frac{0.788 k_1^2}{0.25 + 0.75 \sqrt{1 - k_1^2}}, \quad a_m = \frac{0.788 k_2^2}{0.25 + 0.75 \sqrt{1 - k_2^2}}.$$

Значение функции потока в точке e :

$$STR = -\frac{CIR}{2\pi} [(r_1 + r_3)a_p - (r_2 + r_4)a_m].$$

Радиальная и вертикальная составляющие скорости ветра вне ядра находятся численным дифференцированием ($\beta = 0.2$):

$$WR = \frac{1}{R} \frac{dSTR}{dY} \approx \frac{STR(Y - \beta, R) - STR(Y, R)}{\beta \cdot R},$$

$$WZ = -\frac{1}{R} \frac{dSTR}{dR} \approx \frac{STR(Y,R) - STR(Y,R+b)}{b \cdot R}$$

Разложение радиальной составляющей:

$$WX = WR \cdot X/R, \quad WZ = WR \cdot Z/R.$$

Здесь $X(Z)$ — разность координат по оси x_g (Z_g) точки e и точки центра микровзрыва.

Внутри ядра скорость ветра находится пересчетом с границы пропорционально расстоянию от центра ядра.

1.2. Описание программы

Модель микровзрыва реализуется подпрограммами *STR*, *WAP*, *VV* на языке Фортран (текст в приложении).

1) Подпрограмма-функция *STR*.

Назначение: вычисление функции потока *STR*.

Входные параметры: *HO*, *RO*, *Y*, *R*, *CIR*.

Результат: *STR*.

Используемые подпрограммы: нет.

Форма обращения: *STR(HO, RO, Y, R)*.

Примечание. Циркуляционная сила *CIR* подсчитывается в основной программе, реализующей нелинейную модель движения самолета, и передается в подпрограмму *STR* через *COMMON* -блок.

2) Подпрограмма *WAP*.

Назначение: вычисление составляющих *WR*, *WY* на основе функции *STR*.

Входные параметры: *VO*, *HO*, *RO*, *Y*, *R*.

Используемые подпрограммы: *STR* .

Форма обращения: *CALL WAP (VO , HO , RO , Y , R , WR , WY)* .

3) Подпрограмма *VV* .

Назначение: вычисление составляющих *WX , WY , WZ* .

Входные параметры: *VO , HO , RO , X , Y , Z* .

Выходные параметры: *WX , WY , WZ* .

Используемые подпрограммы: *WAP* .

Форма обращения: *CALL VV (VO , HO , RO , X , Y , Z , WX , WY , WZ)* .

Параметры микровзрыва *VO , HO , RO* , координаты его центра по осям x_g , z_g задаются в основной программе движения самолета. Там же на каждом шаге интегрирования просчитываются величины *X , Y , Z* .

2. ДЕЙСТВУЮЩИЙ СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ

Опишем зависимости, характеризующие принятый в настоящее время (действующий) способ формирования управляющих воздействий δ_{Hz} , δ_{Pz} , δ_{zz} , δ_{Bz} . Эти зависимости переданы ИММ Академией гражданской авиации. Будут приведены две формы записи: операторная и в виде систем дифференциальных уравнений. При моделировании использовалась вторая форма записи.

2.1. Формирование δ_{Hz}

1) Операторная запись:

$$\delta_{Hz} = F_H \left[\left(k_{1\dot{\psi}} + k_{2\dot{\psi}} \frac{T_{\dot{\psi}} p}{T_{\dot{\psi}} p + 1} \right) \omega_y \right],$$

$$k_{1\dot{\psi}} = 2c, \quad k_{2\dot{\psi}} = 2.5c, \quad T_{\dot{\psi}} = 2.5c,$$

$$F_H(s) = \begin{cases} 10, & s > 10^\circ \\ s, & |s| \leq 10^\circ \\ -10, & s < -10^\circ \end{cases} \quad [\text{ГРАД}].$$

2) Дифференциальная запись:

$$\dot{\delta}_{Hz} = \left(k_{1\dot{\psi}} + k_{2\dot{\psi}} \right) \dot{\omega}_y + \frac{1}{T_{\dot{\psi}}} \left(k_{1\dot{\psi}} \omega_y - \delta_{Hz} \right).$$

При интегрировании соблюдается ограничение $|\delta_{H3}| \leq 10^\circ$.

2.2. Формирование δ_{P3}

I) Операторная запись:

$$\dot{\delta}_{P3} = 0.52 \left\{ F_{AT} \left[\frac{1}{2\rho+1} \left(k_V + \frac{k_{\dot{V}} \rho}{0.2\rho+1} \right) (V_0 - V) \right] - \right. \\ \left. - \frac{k_{n_x}}{0.1\rho+1} \left(1 + \frac{0.39\rho}{0.5\rho+1} \right) (n_x - k_{\vartheta AT} \sin \vartheta) \right\},$$

$$k_V = 1.3 \frac{\text{ГРАД/С}}{\text{М/С}}, \quad k_{\dot{V}} = 4.9 \frac{\text{ГРАД/С}}{\text{М/С}^2}, \quad k_{n_x} = 56.6 \text{ ГРАД/С},$$

$$k_{\vartheta AT} = 1 [\text{БЕЗР}], \quad 47^\circ \leq \delta_{P3} \leq 112^\circ.$$

Здесь n_x - перегрузка по продольной оси самолета:

$$n_x = \frac{\ddot{x}}{g} = [\ddot{x}_g \cos \psi \cos \vartheta + (\ddot{y}_g + g) \sin \vartheta - \ddot{z}_g \sin \psi \cos \vartheta] / g$$

И ЗНАЧИТ

$$n_x - k_{\vartheta AT} \sin \vartheta = [\ddot{x}_g \cos \psi \cos \vartheta + \ddot{y}_g \sin \vartheta - \ddot{z}_g \sin \psi \cos \vartheta] / g =$$

$$= [\dot{V}_{g^x g} \cos \psi \cos \vartheta + \dot{V}_{g^y g} \sin \vartheta - \dot{V}_{g^z g} \sin \psi \cos \vartheta] / g = \bar{n}_x.$$

Функция F_{AT} имеет вид

$$F_{AT}(s) = \begin{cases} 5.5, & s > 5.5 \text{ град/с} \\ s, & |s| \leq 5.5 \text{ град/с} \\ -5.5, & s < -5.5 \text{ град/с} \end{cases} \quad [\text{град/с}]$$

2) Дифференциальная запись:

$$\dot{\delta}_{P3} = 0.52 \{ F_{AT}(k_V u_2) - k_{n_x} u_4 \}$$

$$\dot{u}_1 = -\frac{1}{T_2} [u_1 + (1 - \frac{T_1}{T_2})(V - V_0)]$$

$$\dot{u}_2 = \frac{1}{2} [u_1 - u_2 - \frac{T_1}{T_2}(V - V_0)]$$

$$\dot{u}_3 = -2u_3 - 1.56 \bar{n}_x$$

$$\dot{u}_4 = 10u_3 - 10u_4 + 17.8 \bar{n}_x$$

При интегрировании соблюдается ограничение $47^\circ \leq \delta_{P3} \leq 112^\circ$

2.3. Формирование $\delta_{\text{эз}}$

I) Операторная запись:

$$\delta_{\text{эз}} = F_{\text{э}} \left[k_{\gamma} \gamma - k_{\gamma\beta} \gamma_{\beta} + k_{\omega_x} \frac{T_{\omega_x} p}{T_{\omega_x} p + 1} \cdot \omega_x \right],$$

$$k_{\gamma} = 2.8 \text{ [БЕЗР]}, \quad k_{\gamma\beta} = 2 \text{ [БЕЗР]}, \quad k_{\omega_x} = 1.5 \text{ с}, \quad T_{\omega_x} = 1.6 \text{ с},$$

$$F_{\text{э}}(s) = \begin{cases} 10, & s > 10^{\circ} \\ s, & |s| \leq 10^{\circ} \\ -10, & s < -10^{\circ} \end{cases} \text{ [ГРАД]},$$

$$\gamma_{\beta} = -F_{\gamma} \left[(k_{\varepsilon} \varepsilon - \tilde{k}_{\gamma\beta} \frac{1}{T_1 p + 1} \gamma_{\beta}) + F_1 \left(\frac{T_2 p}{T_2 p + 1} (k_{\dot{\varepsilon}} \dot{\varepsilon} - k_{\dot{\psi}} \dot{\psi}) \right) \right],$$

$$k_{\varepsilon} = \begin{cases} 8, & y_g > 30 \text{ м} \\ 6, & y_g \leq 30 \text{ м} \end{cases} \text{ [БЕЗР]}, \quad \tilde{k}_{\gamma\beta} = 1 \text{ [БЕЗР]}, \quad T_1 = 15 \text{ с},$$

$$T_2 = 1 \text{ с}, \quad k_{\dot{\varepsilon}} = \begin{cases} 120, & y_g > 30 \text{ м} \\ 80, & y_g \leq 30 \text{ м} \end{cases} \text{ [БЕЗР]}, \quad k_{\dot{\psi}} = \begin{cases} 5, & y_g > 30 \text{ м} \\ 8, & y_g \leq 30 \text{ м} \end{cases} \text{ [БЕЗР]}$$

$$F_{\gamma}(s) = \begin{cases} 10, & s > 10^{\circ} \\ s, & |s| \leq 10^{\circ} \text{ [ГРАД]} \\ -10, & s < -10^{\circ} \end{cases}, \quad F_1(s) = \begin{cases} 32, & s > 32^{\circ} \\ s, & |s| \leq 32^{\circ} \text{ [ГРАД]} \\ -32, & s < -32^{\circ} \end{cases}.$$

Символ ε в формуле для γ_z означает угловое отклонение самолета в горизонтальной плоскости от оси ВПП, замеряемое при помощи курсового радиомаяка.

2) Дифференциальная запись:

$$\dot{\delta}_{\varepsilon z} = F_{\varepsilon} [k_{\gamma} \gamma - k_{\gamma z} \gamma_z + k_{\omega x} (u_5 + \omega_x)],$$

$$\dot{u}_5 = -\frac{1}{T_{\omega x}} (u_5 + \omega_x),$$

$$\dot{\gamma}_z = -F_{\gamma} [(k_{\varepsilon} \varepsilon - \tilde{k}_{\gamma z} u_6) + F_1 (u_7 + k_{\varepsilon} \varepsilon - k_{\psi} \psi)],$$

$$\dot{u}_6 = -\frac{1}{T_1} (u_6 - \gamma_z),$$

$$\dot{u}_7 = -\frac{1}{T_2} (u_7 + k_{\varepsilon} \varepsilon - k_{\psi} \psi).$$

Величина ε при моделировании просчитывается по формуле

$$\varepsilon = \frac{180^{\circ}}{\pi} z_g / (d + 4000 - x_g) \text{ [ГРАД]},$$

где d [М] - расстояние по оси ВП от начальной точки до торца ВП.

2.4. Формирование $\delta_{вз}$

I) Операторная запись:

$$\delta_{вз} = F_B [-\Delta \vartheta_3 + \delta_{МЭТ} + k_{\omega_x} \omega_x],$$

$$k_{\omega_x} = 4.5 c, \quad F_B(s) = \begin{cases} 10, & s > 10^\circ \\ s, & |s| \leq 10^\circ \text{ [ГРАД]}, \\ -10, & s < -10^\circ \end{cases}$$

$$\dot{\delta}_{МЭТ} = f_{МЭТ}(\Delta \vartheta_3) = \begin{cases} 0.6, & \Delta \vartheta_3 < -2^\circ \\ 0, & |\Delta \vartheta_3| \leq 2^\circ \text{ [ГРАД/С]}, \\ -0.6, & \Delta \vartheta_3 > 2^\circ \end{cases}$$

$$|\delta_{МЭТ}| \leq 10^\circ,$$

$$\Delta \vartheta_3 = -F_{\vartheta} \left\{ 26 \left[\frac{1}{1.4\rho+1} \left(\left(1 + \frac{13.8\rho}{0.7\rho+1} \right) \varepsilon_r + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + 0.54 \frac{1.7\rho}{1.7\rho+1} \vartheta \right) + 0.133 \frac{15\rho}{15\rho+1} \vartheta \right] \right\},$$

$$F_{\vartheta} (s) = \begin{cases} 7.5, & s > 7.5^{\circ} \\ s, & |s| \leq 7.5^{\circ} \\ -7.5, & s < -7.5^{\circ} \end{cases} \quad [\text{ГРАД}].$$

Символ ε_n в формуле для $\Delta \vartheta_z$ означает угловое отклонение самолета в вертикальной плоскости от глиссады, замеряемое при помощи глиссадного и курсового радиомаяков.

2) Дифференциальная запись:

$$\delta_{вз} = F_{в} [-\Delta \vartheta_z + \delta_{мэт} + k_{\omega_x} \omega_x],$$

$$\dot{\delta}_{мэт} = f_{мэт} (\Delta \vartheta_z),$$

$$\Delta \vartheta_z = -F_{\vartheta} \{ 26 [u_9 + 0.133 (u_8 + \vartheta)] \},$$

$$\dot{u}_8 = -\frac{1}{15} (u_8 + \vartheta)$$

$$\dot{u}_9 = \frac{1}{1.4} \left[-u_9 + u_{10} + \frac{14.5}{0.7} \varepsilon_{\Gamma} + 0.54 (u_{11} + \vartheta) \right]$$

$$\dot{u}_{10} = \frac{1}{0.7} \left[-u_{10} + \left(1 - \frac{14.5}{0.7} \right) \varepsilon_{\Gamma} \right]$$

$$\dot{u}_{11} = -\frac{1}{1.7} (u_{11} + \vartheta)$$

При интегрировании соблюдается ограничение $|\delta_{\text{мэт}}| \leq 10^\circ$.
 Величина ε_r просчитывается по формуле

$$\varepsilon_r = \frac{180^\circ}{\pi} \Delta y_g / (d + 350 - x_g) \quad [\text{ГРАД}]$$

Замечание. Начальные условия для выписанных выше дифференциальных уравнений следует выбирать с учетом отклонений начальных значений фазового вектора нелинейной системы движения от номинала. В разделе 3 будут приведены результаты моделирования для нулевых начальных отклонений. В этом случае полагается

$$\delta_{pz}(0) = 74^\circ, \quad u_g(0) = -\vartheta_0, \quad u_H(0) = -\vartheta_0$$

(ϑ_0 - номинальное значение угла тангажа). Остальные начальные условия нулевые.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Процесс посадки моделировался до момента пролета торца ВПП. Система нелинейных дифференциальных уравнений движения самолета подробно описана в /I/.

Начальное значение фазового вектора нелинейной системы было взято соответствующим номиналу движения по глиссаде снижения. Начальное расстояние по оси x_g от торца ВПП выбрано равным 8000 м.

Ветровое возмущение в виде компонент

$$W_{x_g} = WX, \quad W_{y_g} = WY, \quad W_{z_g} = WZ$$

подавалось в нелинейную систему с модели микровзрыва.

Управляющие воздействия формировались двумя способами. Способ I_A (действующий) использует алгоритмы, описанные в разделе 2. В способе $I_{иг}$ (игровой) воздействия $\delta_{эз}$, $\delta_{вз}$ формируются при помощи линий переключения, определяющих соответствующие компоненты оптимальной стратегии первого игрока во вспомогательных линейных игровых задачах /I/, воздействия $\delta_{нз}$, $\delta_{рз}$ - при помощи алгоритмов раздела 2. Методика построения игрового управления изложена в /I/.

Шаг выбора ветровой помехи и управления равен 0.1 с.

Рассмотрены три варианта параметров микровзрыва:

$$1) \quad VO = 5 \text{ м/с}, \quad HO = 250 \text{ м}, \quad RO = 500 \text{ м},$$

$$2) \quad VO = 7 \text{ м/с}, \quad HO = 250 \text{ м}, \quad RO = 700 \text{ м},$$

$$3) \quad VO = 10 \text{ м/с} , \quad HO = 600 \text{ м} , \quad RO = 1200 \text{ м} .$$

Варианты расположения центра микровзрыва по осям x_g и z_g :

а) $DX = 5000 \text{ м} , \quad DZ = 0$, в) $DX = 5000 \text{ м} , \quad DZ = 500 \text{ м}$,
 с) $DX = 3000 \text{ м} , \quad DZ = 0$, d) $DX = 3000 \text{ м} , \quad DZ = 500 \text{ м}$.

Координата DX отсчитывается по оси x_g от начального состояния $x_g(0) = 0$. Снимаемый с модели микровзрыва ветер становится практически нулевым на расстоянии $\geq 2RO$ от центральной оси микровзрыва .

Результаты счета представлены на рис. 3.1-3.29. Каждая из трех серий рисунков (по количеству вариантов набора параметров микровзрыва) начинается рисунком распределения скорости ветра в вертикальной плоскости, проходящей через центральную ось микровзрыва. Далее идут в отклонениях от номинала графики изменения наиболее важных координат нелинейной системы движения самолета и графики изменения скорости ветра вдоль движения. По горизонтали - пройденное расстояние по оси x_g , по вертикали - отклонение от номинала. Графики просчитаны для способов управления I_A и I_u . Шаг вывода на график в 4 раза больше шага интегрирования. Этим объясняется наличие на некоторых графиках для δ'_B и δ'_g горизонтальных площадок на уровне, не равном уровню ограничения этих величин.

Сечение микровзрыва ($V_0 = 5$ м/с, $H_0 = 250$ м, $R_0 = 500$ м)

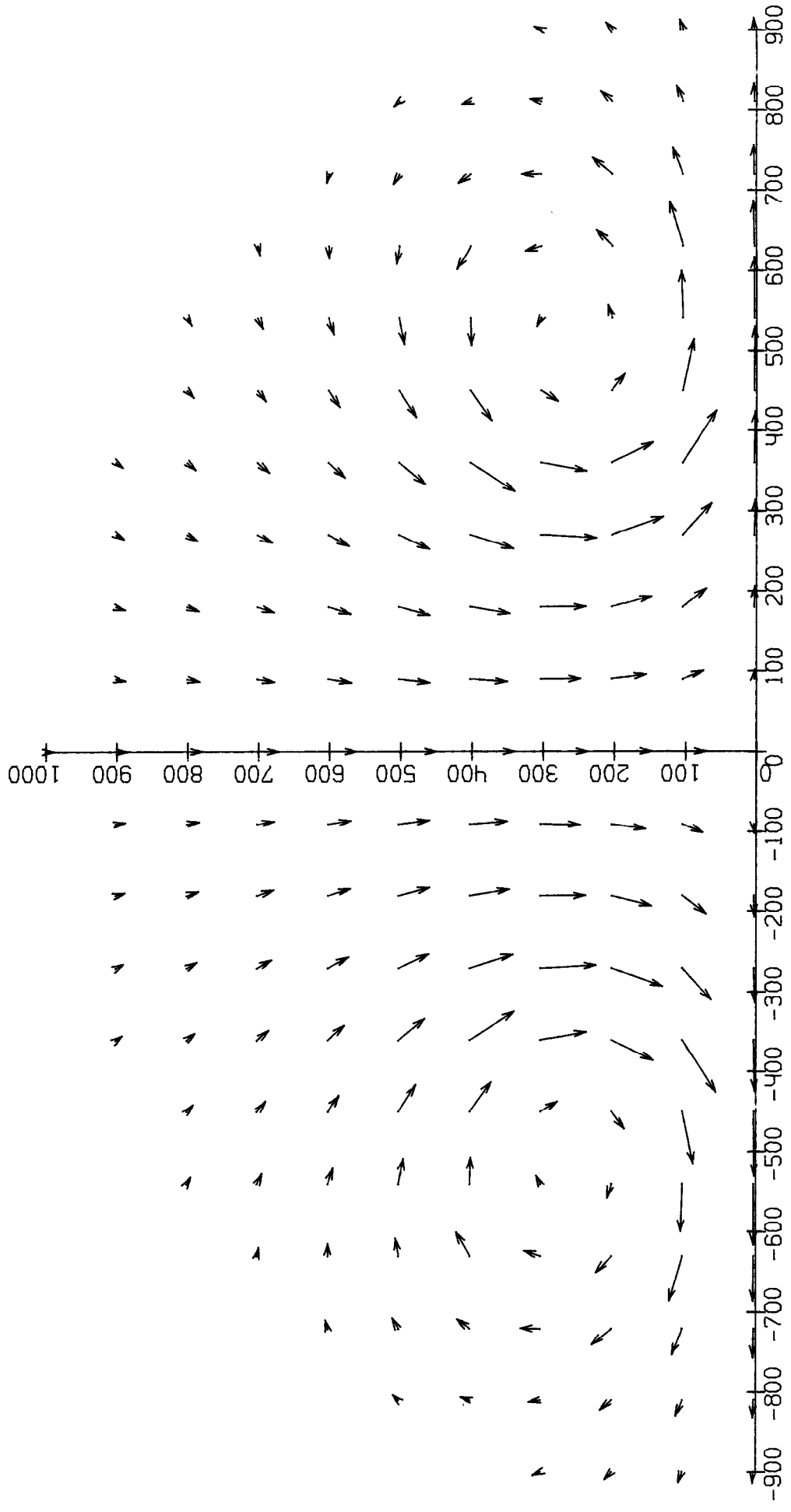


Рис.3.1

Реализации при действующем способе (микровзрыв: $V_0 = 5$ м/с, $H_0 = 250$ м, $R_0 = 500$ м, $DX = 5000$ м, $DZ = 0$ м)

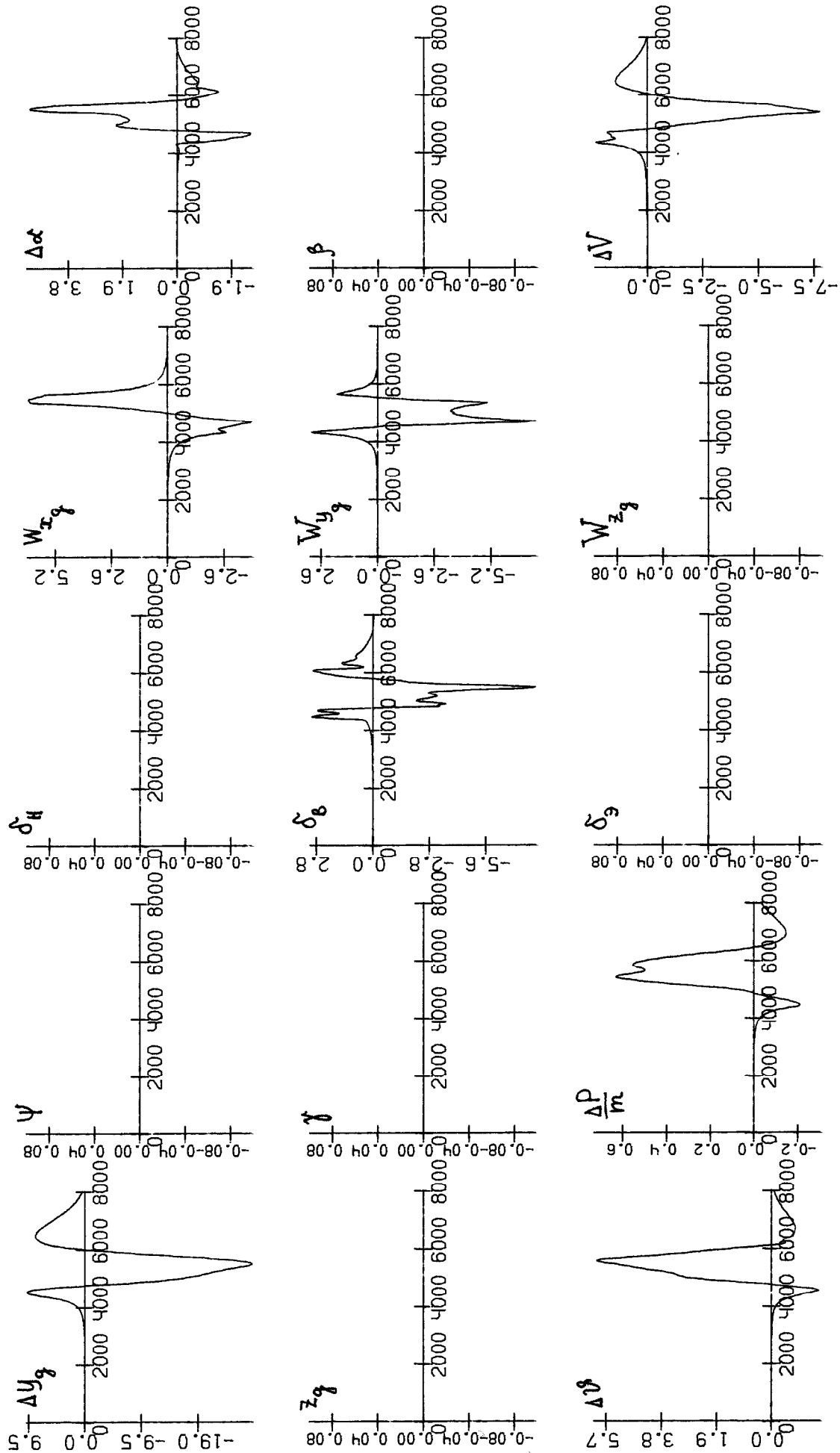


Рис. 3.2

Реализации при действующем способе (микровзрыв: $V_0 = 5$ м/с, $H_0 = 250$ м, $R_0 = 500$ м, $DX = 5000$ м, $DZ = 0$ м)

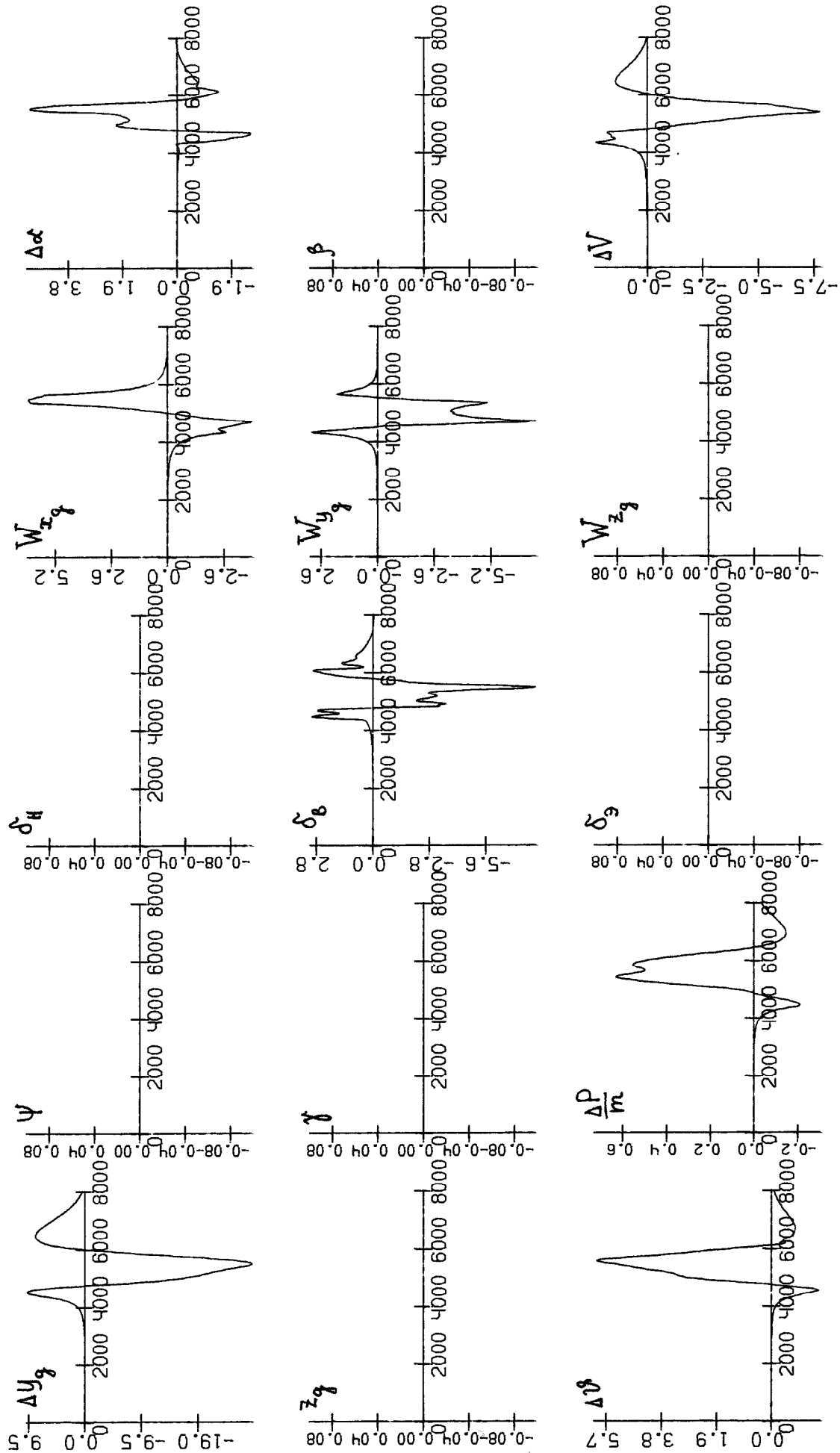


Рис. 3.2

Реализации при действующем способе (микровзрыв: $VO = 5$ м/с, $HO = 250$ м, $RO = 500$ м, $DX = 5000$ м, $DZ = 500$ м);

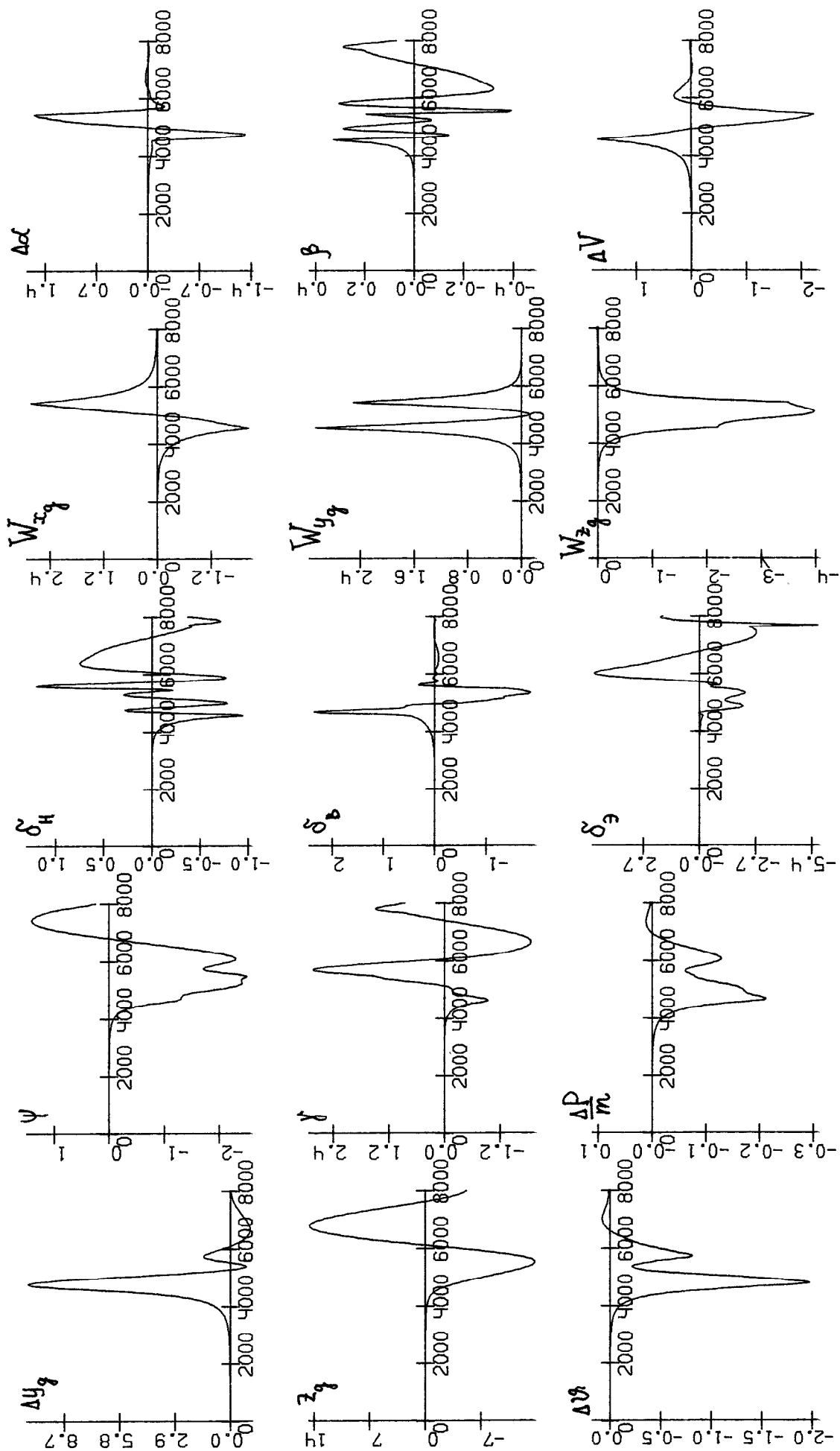


Рис. 3.4

Реализации при игровом способе (микровзрыв: $V_0 = 5$ м/с, $H_0 = 250$ м, $R_0 = 500$ м, $Dx = 5000$ м, $Dz = 500$ м)

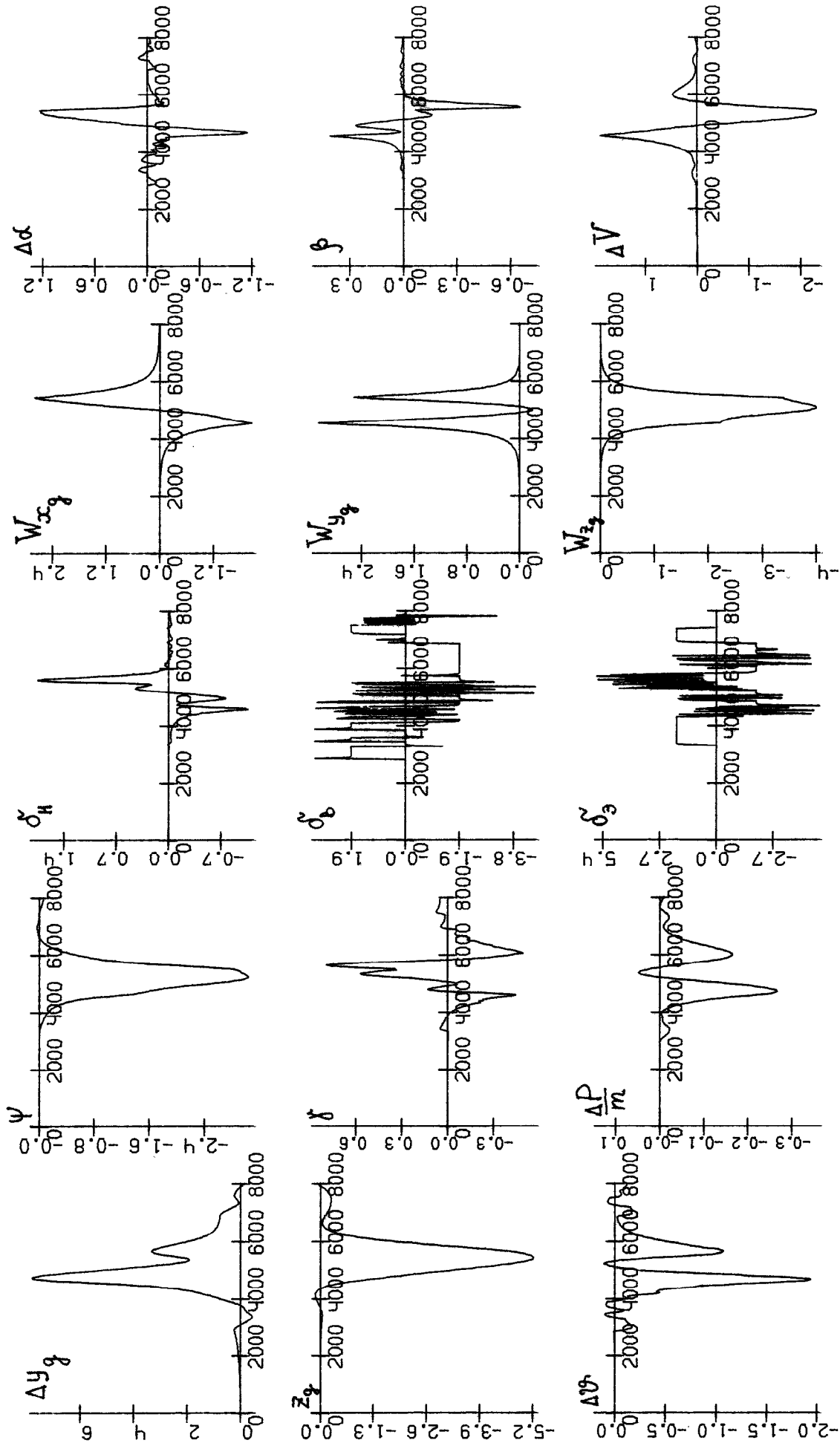


Рис. 3.5

Реализации при действующем слое (микроэрыв: $VO = 5$ м/с, $HO = 250$ м, $RO = 500$ м, $DX = 3000$ м, $DZ = 0$ м)

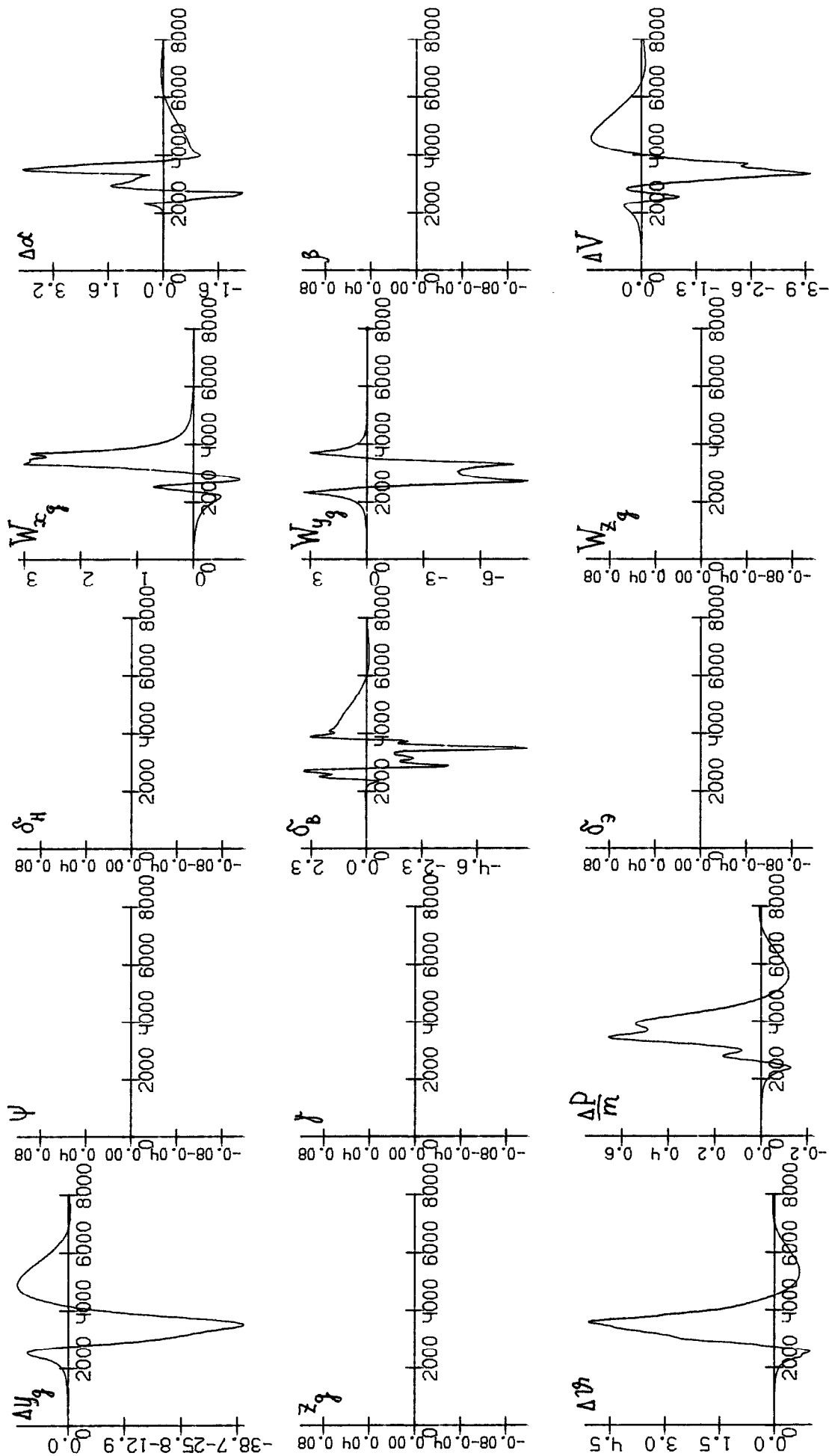


Рис. 3.6

Реализации при игровом способе (микроэвры: $V_0 = 5$ м/с, $H_0 = 250$ м, $R_0 = 500$ м, $DX = 3000$ м, $DZ = 0$ м)

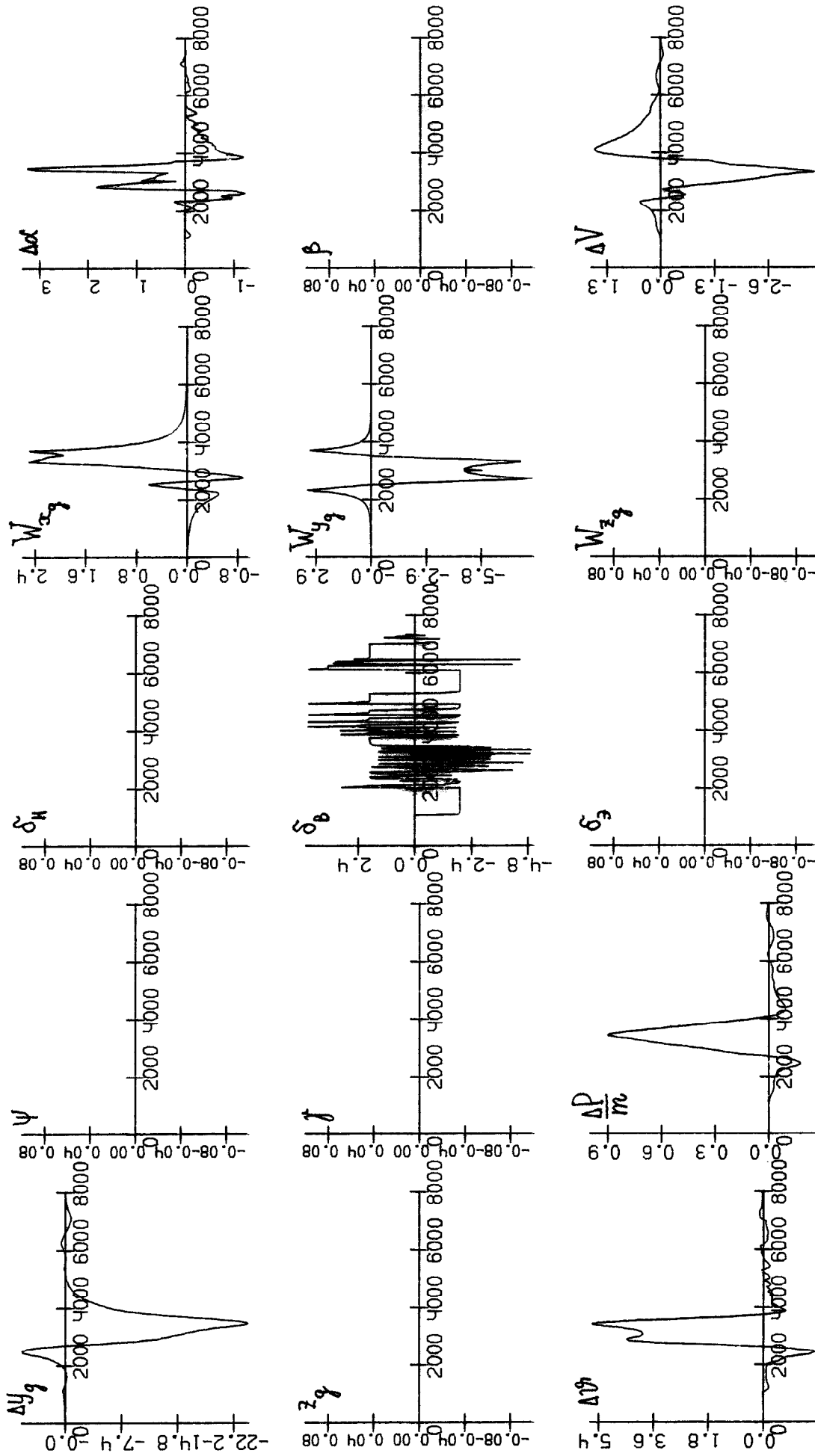


Рис.3.7

Реализации при действующем слое (микровзрыв: $VO = 5$ м/с, $HO = 250$ м, $RO = 500$ м, $DX = 3000$ м, $DZ = 500$ м)

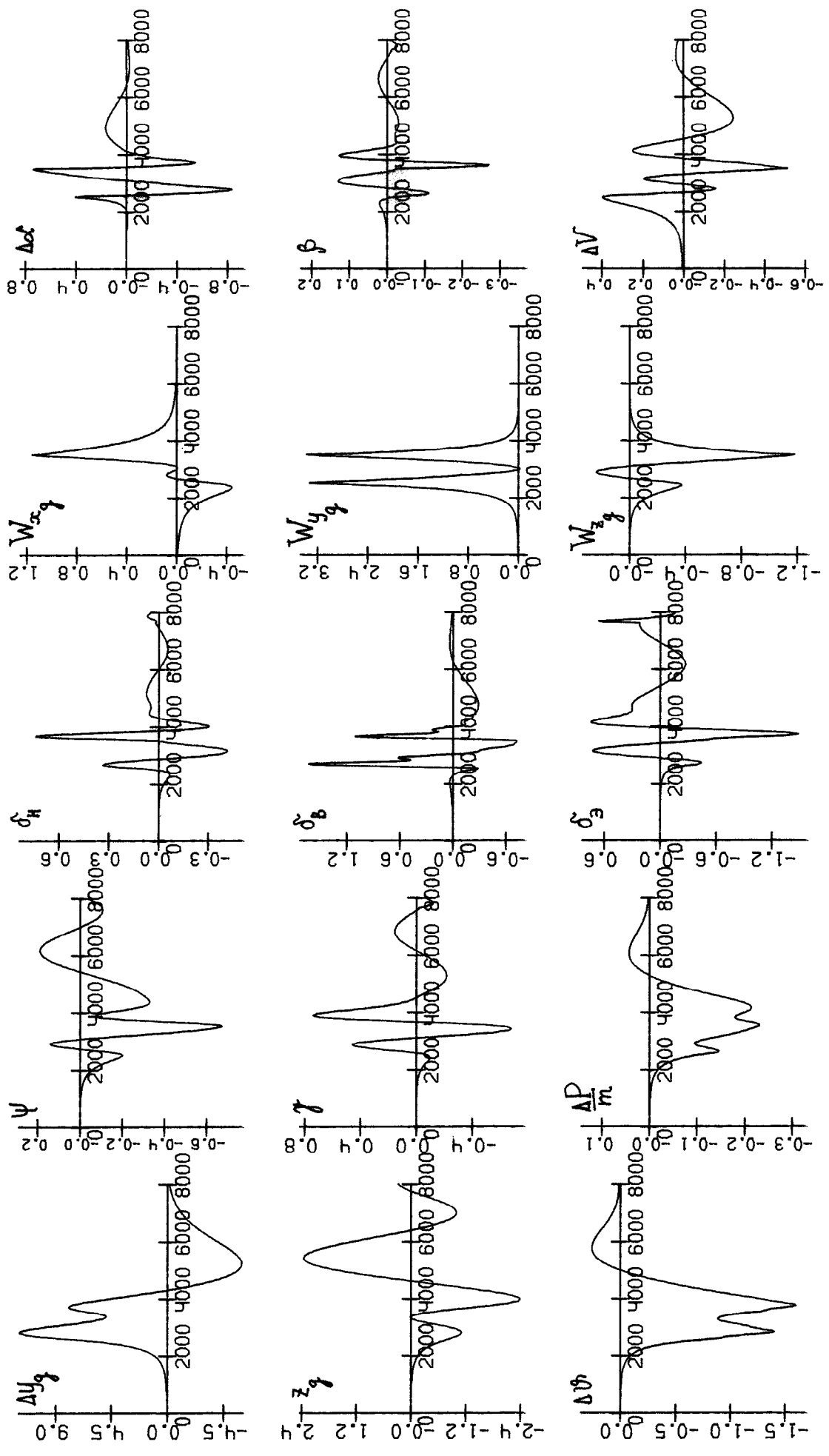


Рис. 3.8

Реализации при игровом слособе (микровзрыв: $V_0 = 5$ м/с, $H_0 = 250$ м, $R_0 = 500$ м, $D_X = 3000$ м, $D_Z = 500$ м)

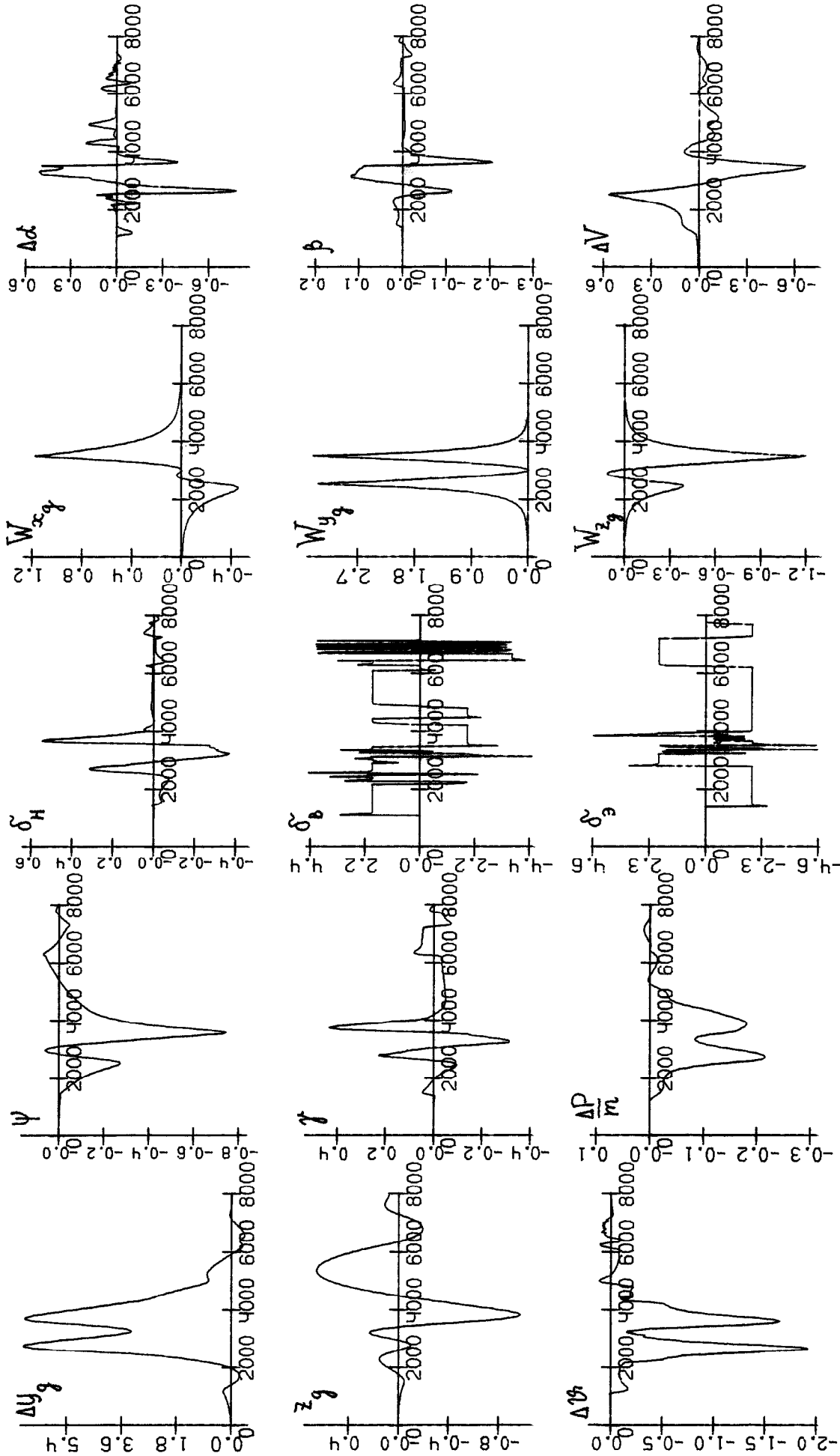


Рис. 3.9

Реализации отклонений и скорости ветра при действующем и игровом способах (микровзрыв: $VO = 5$ м/с, $HO = 250$ м, $RO = 500$ м, $DX = 5000$ м, $DZ = 500$ м)

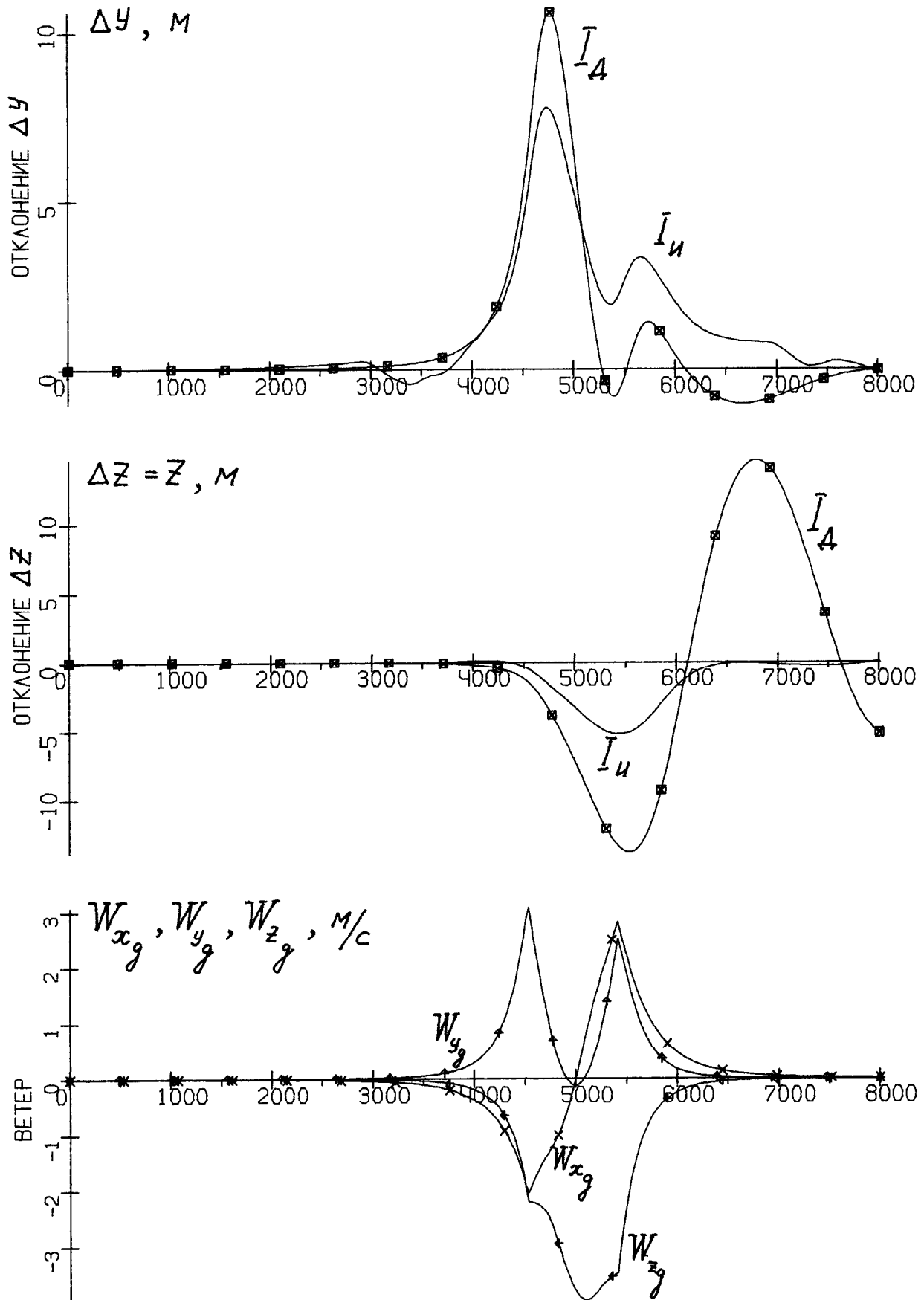


Рис.3.10

Реализации отклонений и скорости ветра при действующем и игровом способах (микровзрыв: $V_0=5$ м/с, $H_0=250$ м, $R_0=500$ м, $DX=3000$ м, $DZ=500$ м)

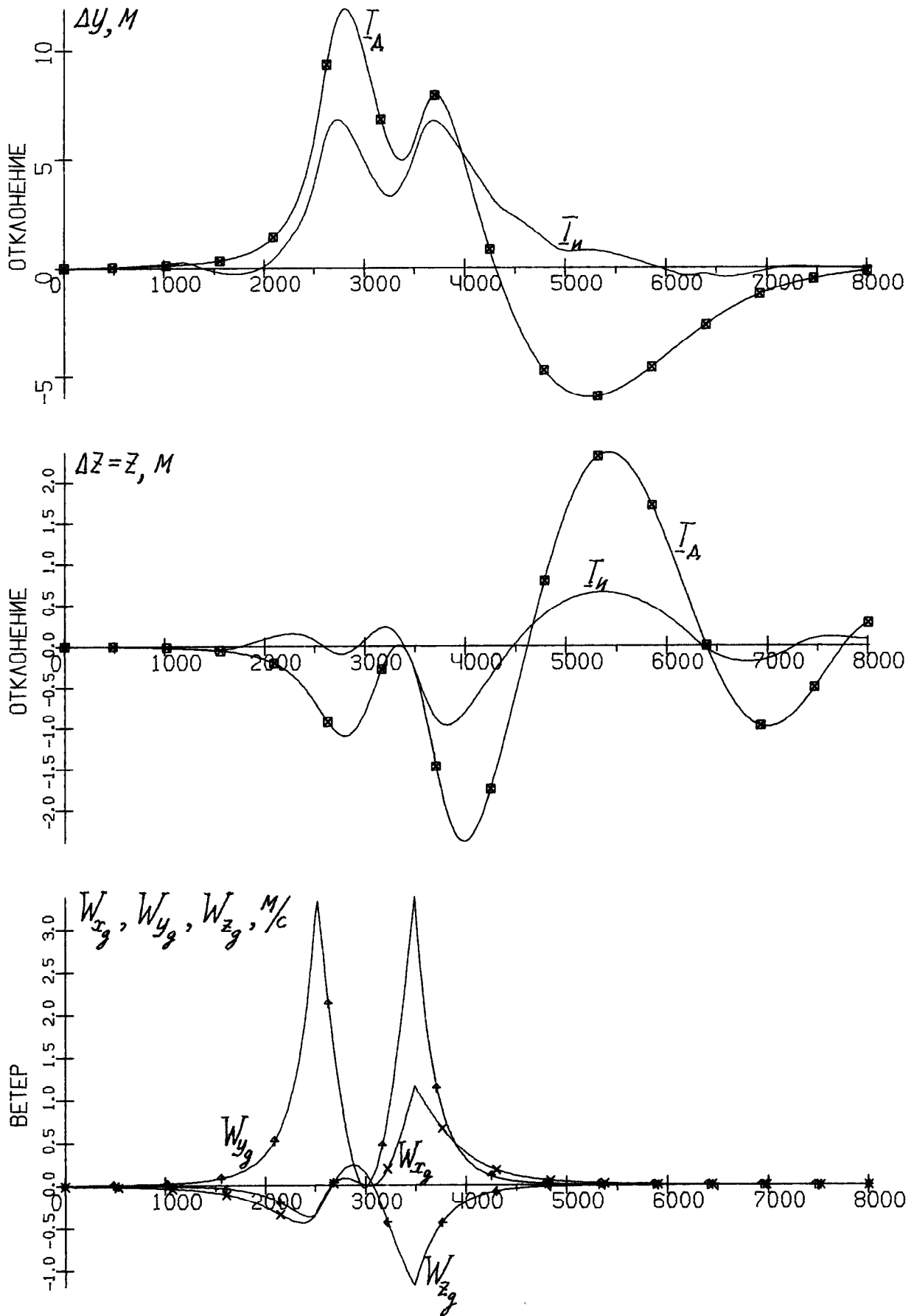


Рис.3.II

Сечение микровзрыва ($V_0 = 7$ м/с, $H_0 = 250$ м, $H_0 = 700$ м)

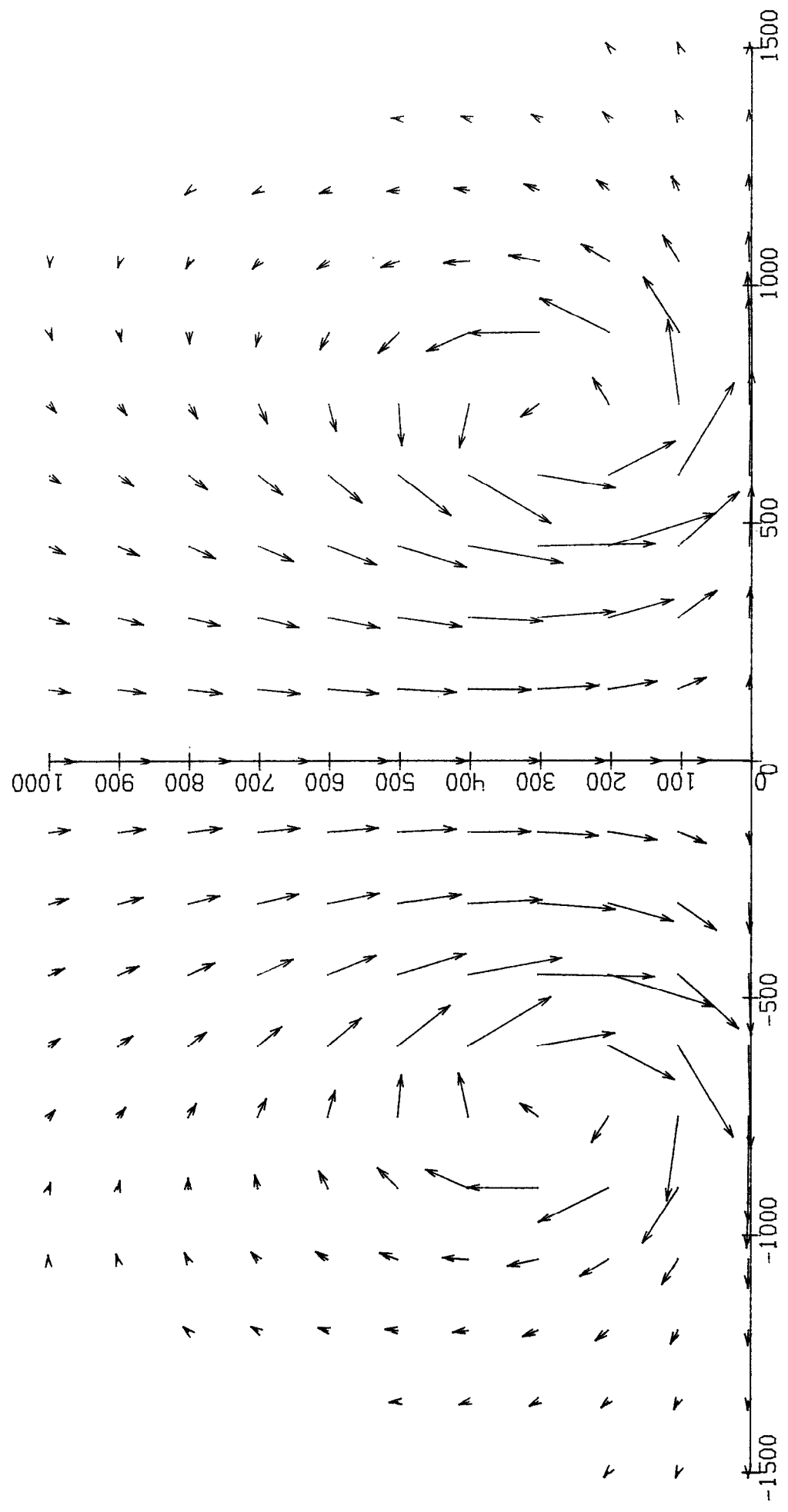


Рис.3.12

Реализации при действующем способе (микрозрыв: $V_0 = 7$ м/с, $H_0 = 250$ м, $R_0 = 700$ м, $DX = 5000$ м, $DZ = 0$ м

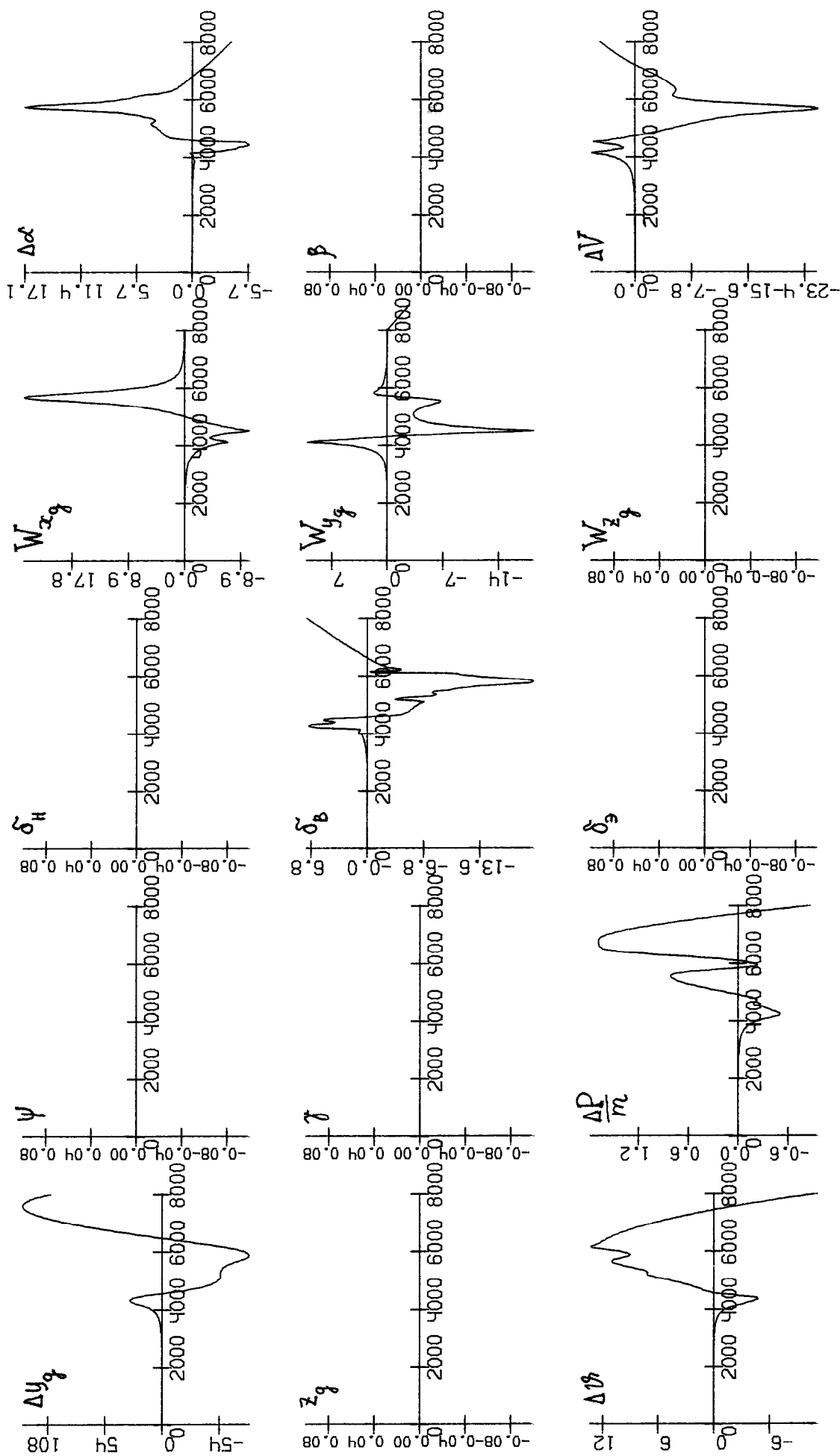


Рис. 3.13

Реализации при игровом способе (микровзрыв: $V_0 = 7$ м/с, $H_0 = 250$ м, $R_0 = 700$ м, $DX = 5000$ м, $DZ = 0$ м)

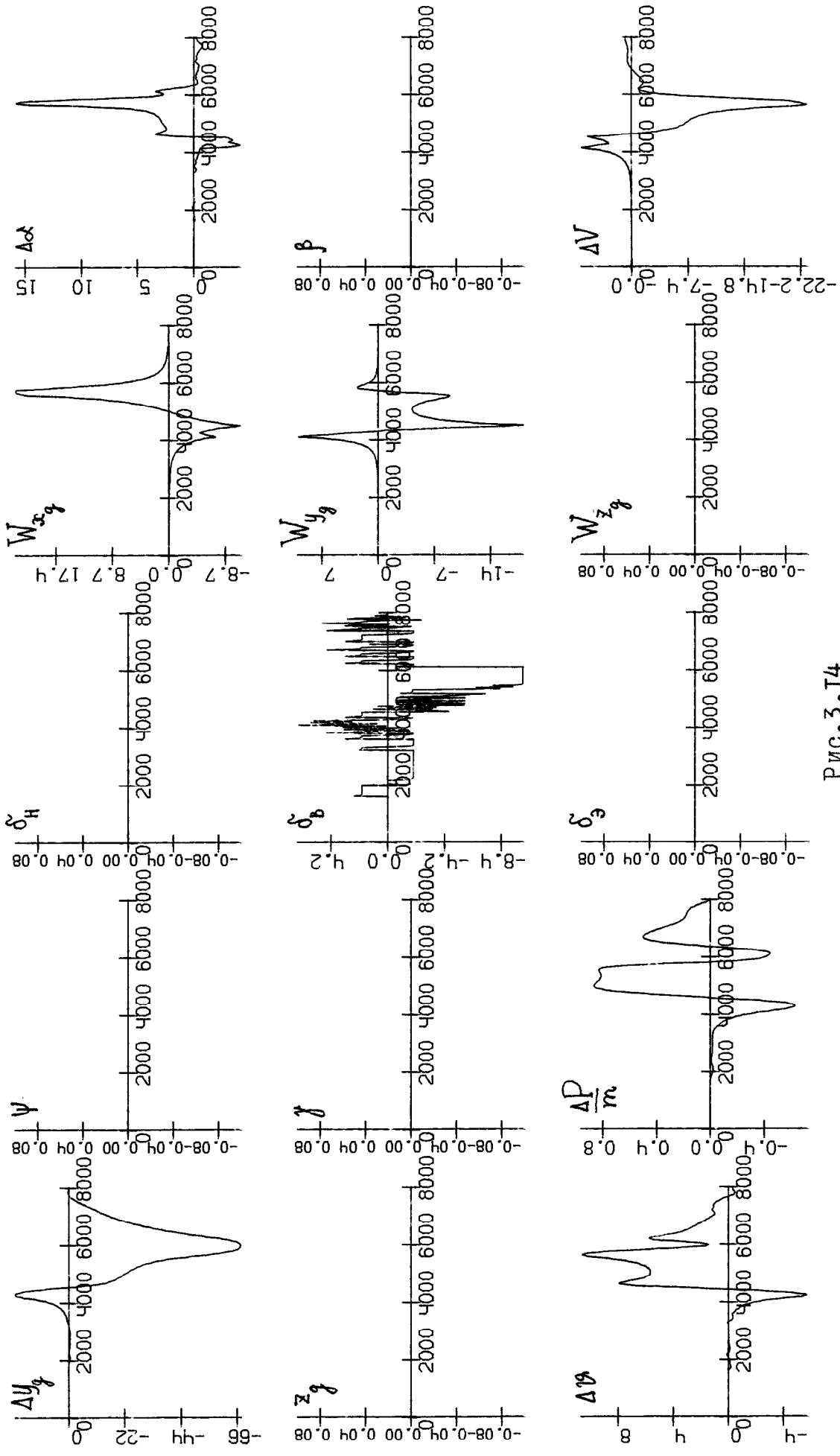


Рис. 3.14

Реализации при действующем слое (микроэвры: $V_0 = 7$ м/с, $H_0 = 250$ м, $R_0 = 700$ м, $DX = 5000$ м, $DZ = 500$ м

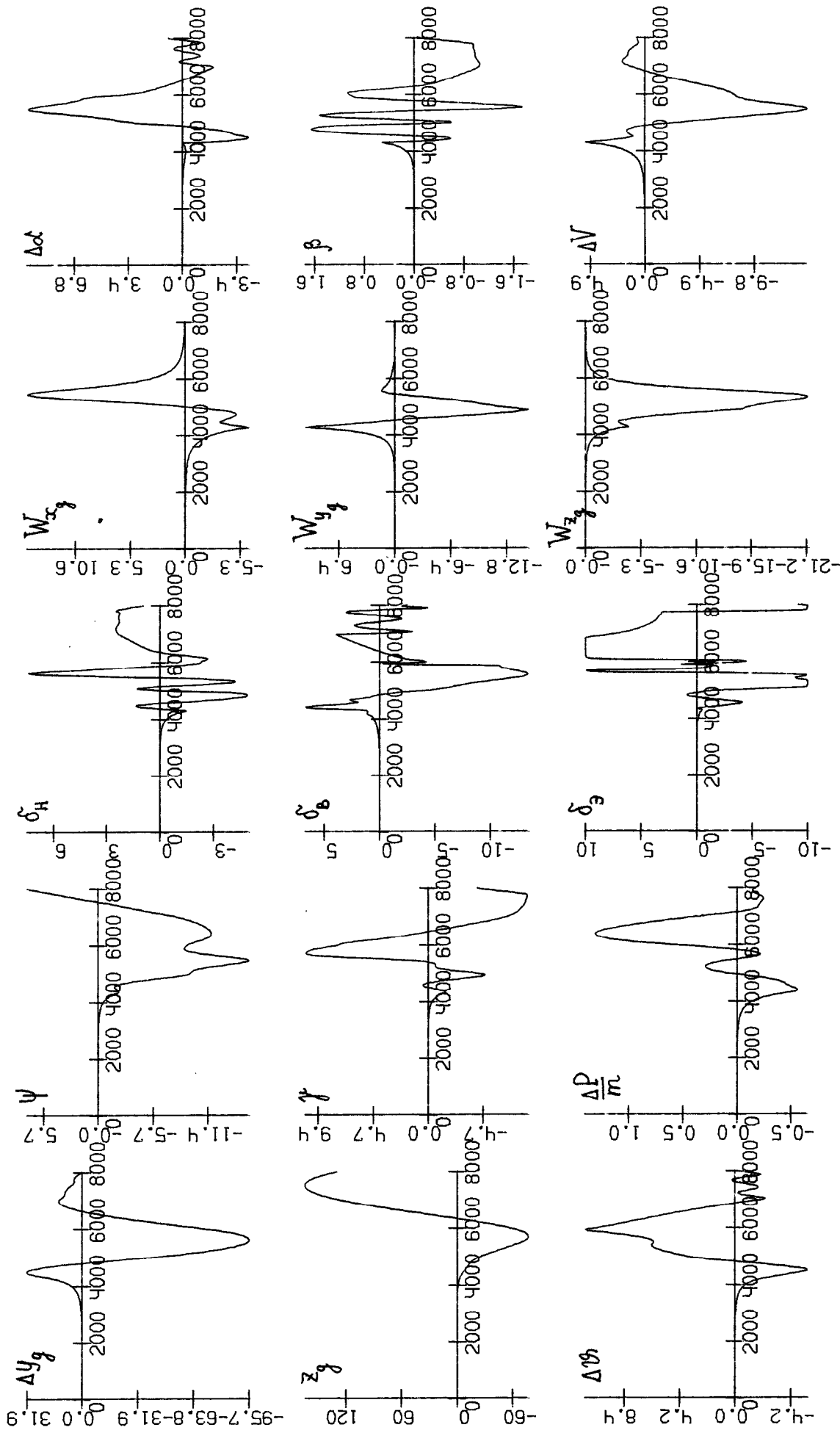


Рис. 3.15

Реализации при игровом способе (микровзрыв: $V_0 = 7$ м/с, $H_0 = 250$ м, $R_0 = 700$ м, $DX = 5000$ м, $DZ = 500$ м)

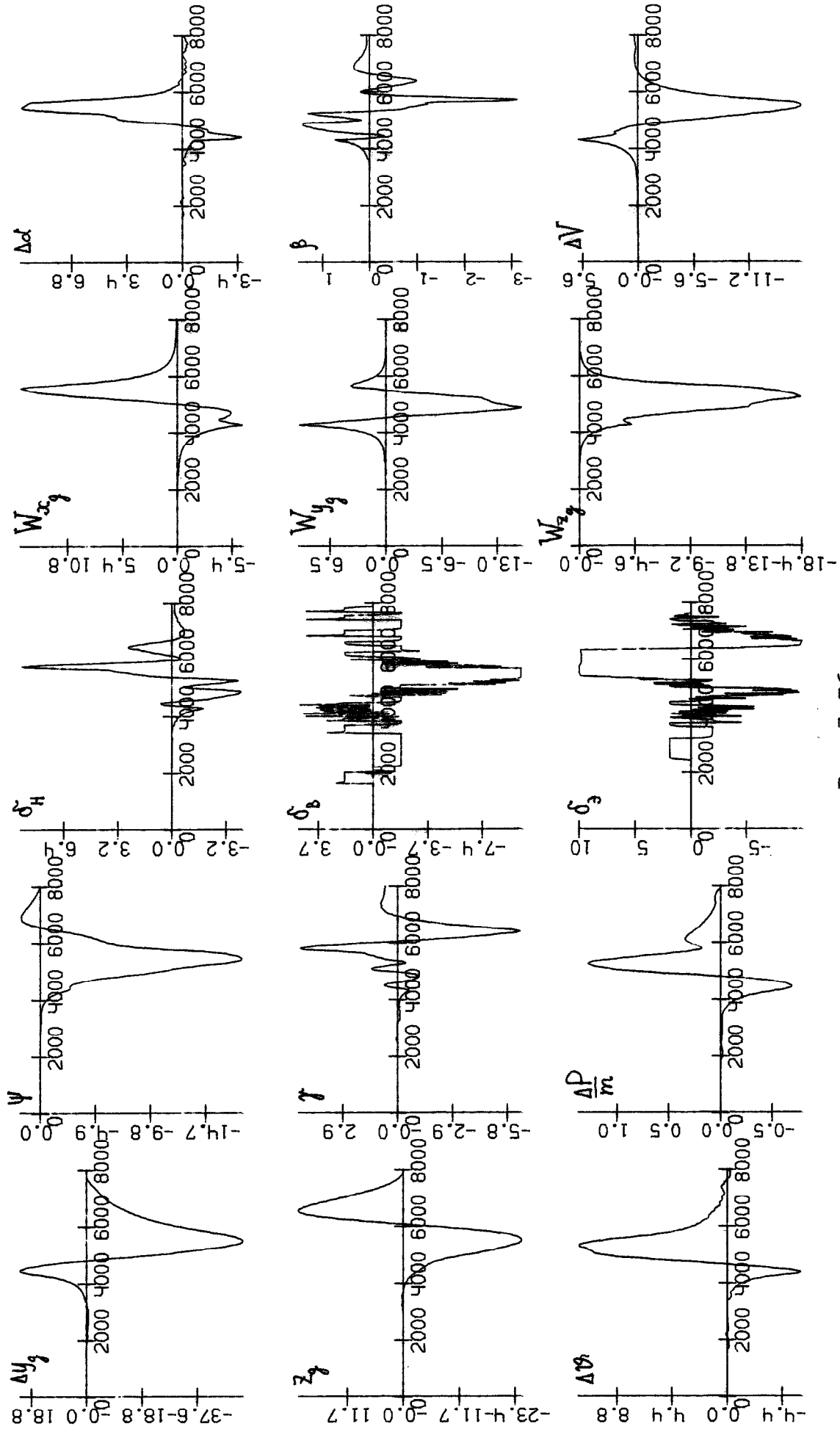


Рис.3.16

Реализации при действующем слое (микровзрыв: $V_0 = 7$ м/с, $H_0 = 250$ м, $R_0 = 700$ м, $DX = 3000$ м, $DZ = 0$ м)

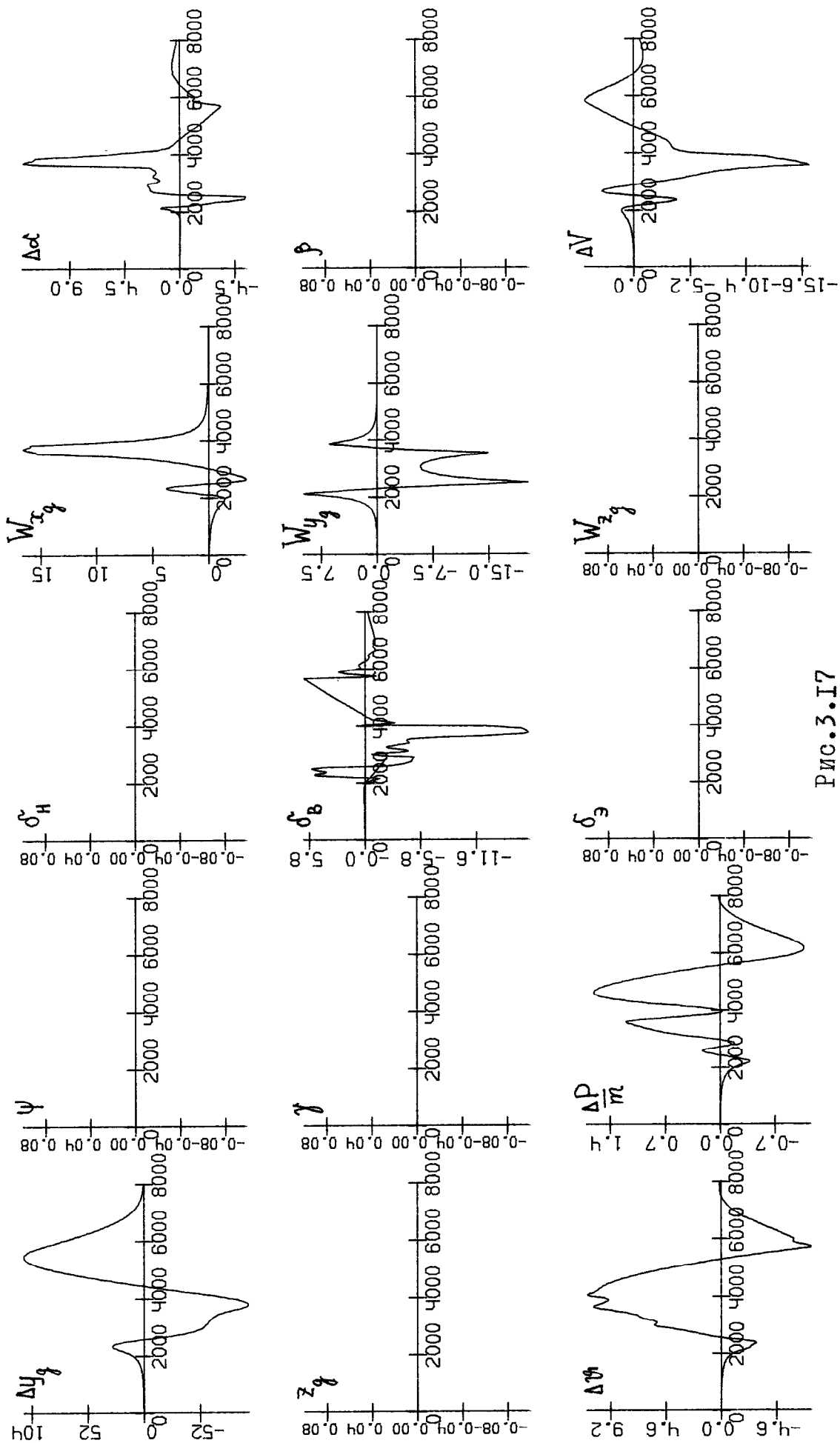


Рис.3.17

Реализации при игровом способе (микроэрвзв: $V_0 = 7$ м/с, $H_0 = 250$ м, $RO = 700$ м, $DX = 3000$ м, $DZ \approx 0$ м)

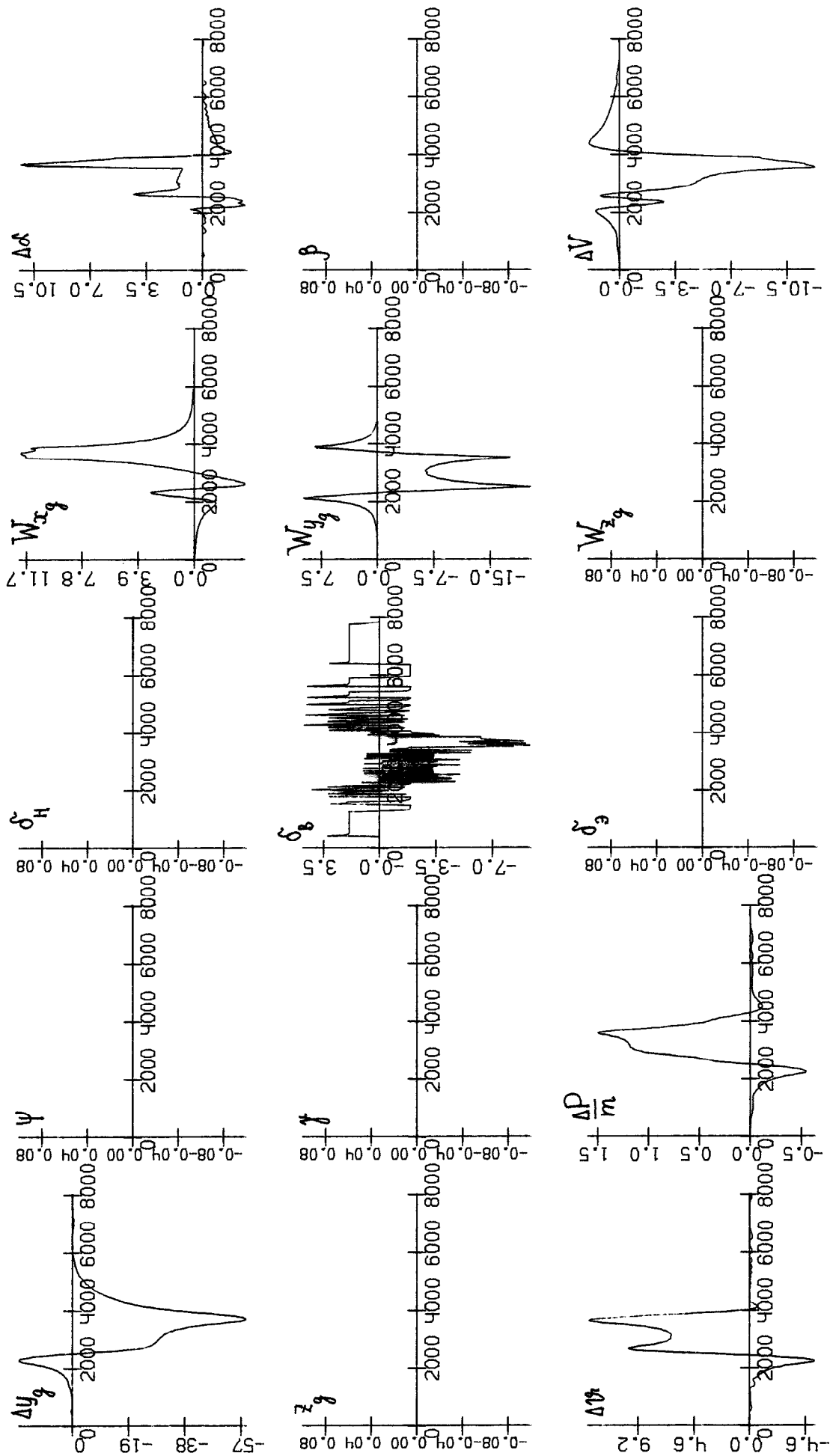


Рис. 3.18

Результаты при действующем слое (микроэриб: $VO = 7$ м/с, $HO = 250$ м, $RO = 700$ м, $DX = 3000$ м, $DZ = 500$ м)

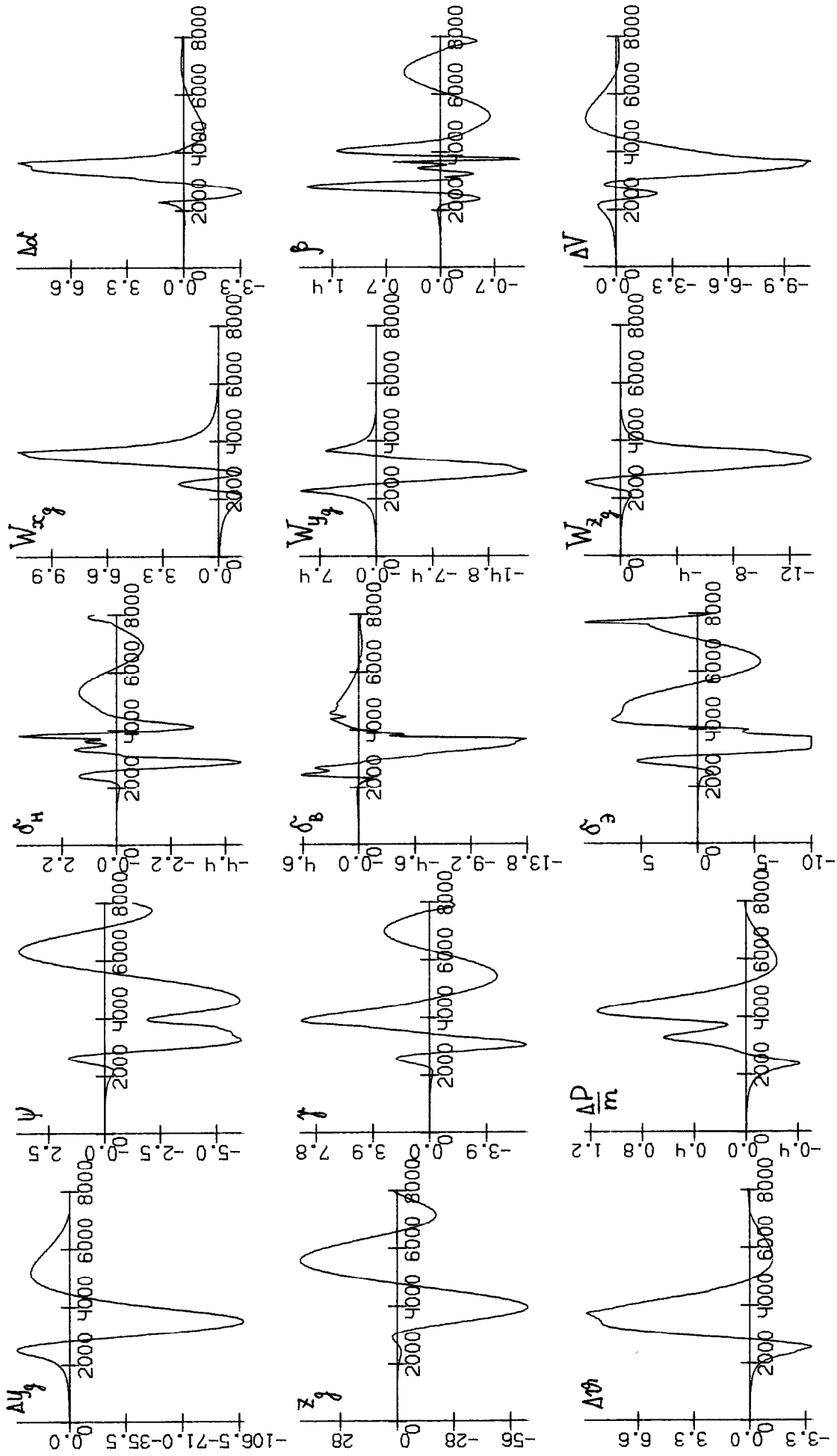


Рис.3.19

Реализации при игровом способе (микровзрыв: $V_0 = 7 \text{ м/с}$, $H_0 = 250 \text{ м}$, $R_0 = 700 \text{ м}$, $Dx = 3000 \text{ м}$, $Dz = 500 \text{ м}$)

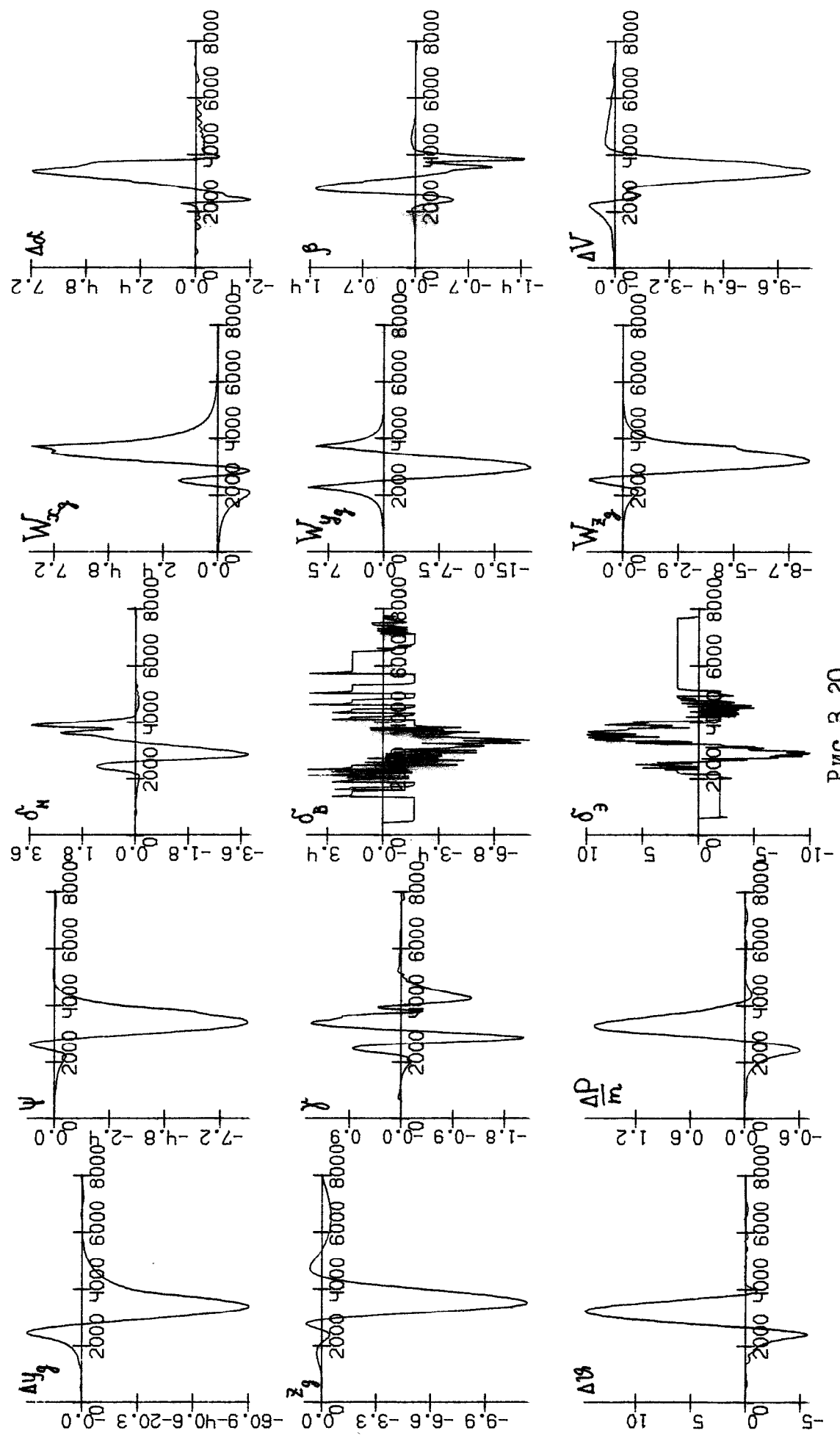


Рис. В.20

Сечение микровёрты ($V_0 = 10$ м/с, $H_0 = 600$ м, $R_0 = 1200$ м)

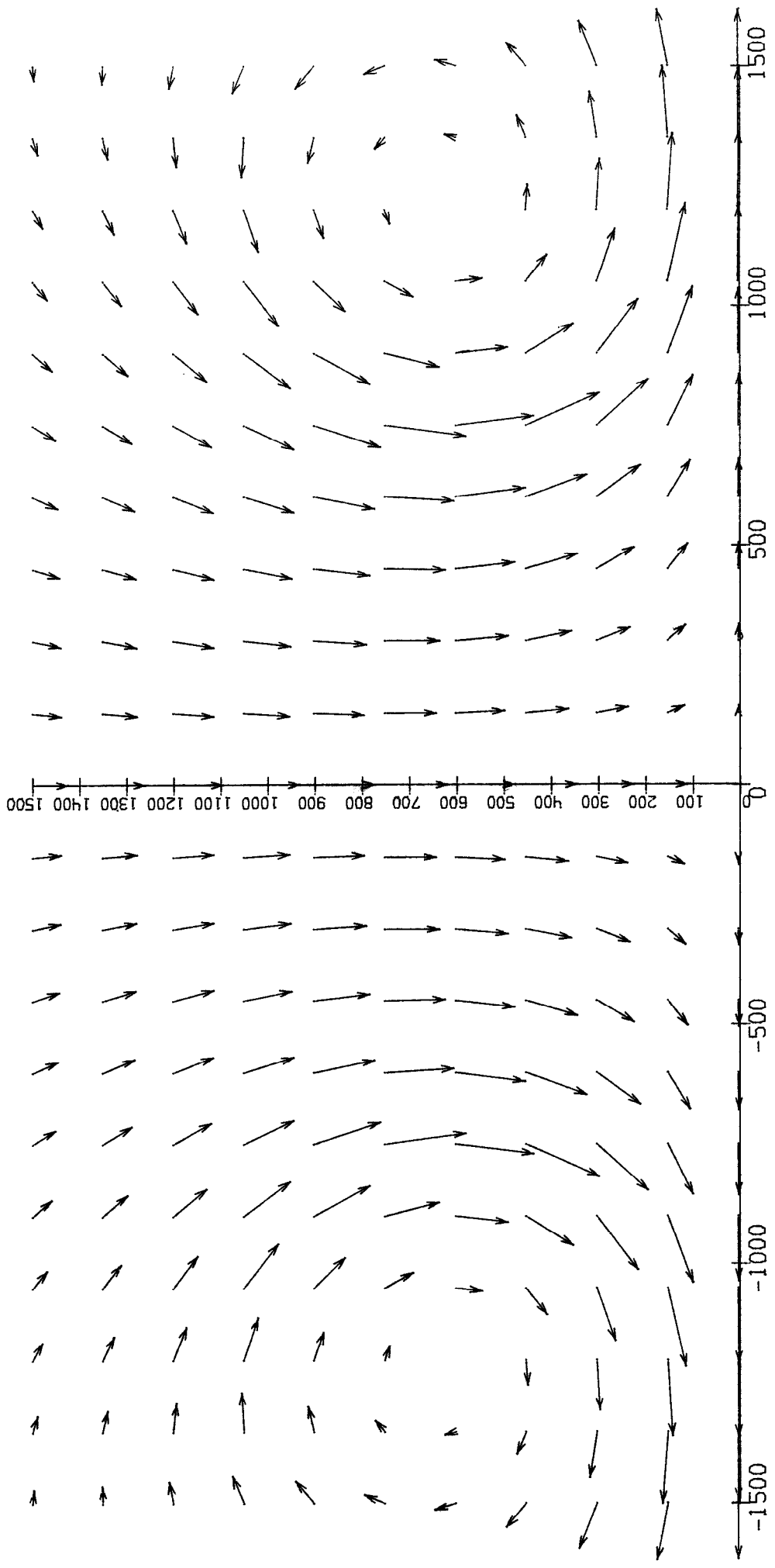


Рис. 3.21

Реализации при действующем способе (микровзрыв: $V_0=10$ м/с, $H_0=600$ м, $R_0=1200$ м, $DX=5000$ м, $DZ=0$ м)

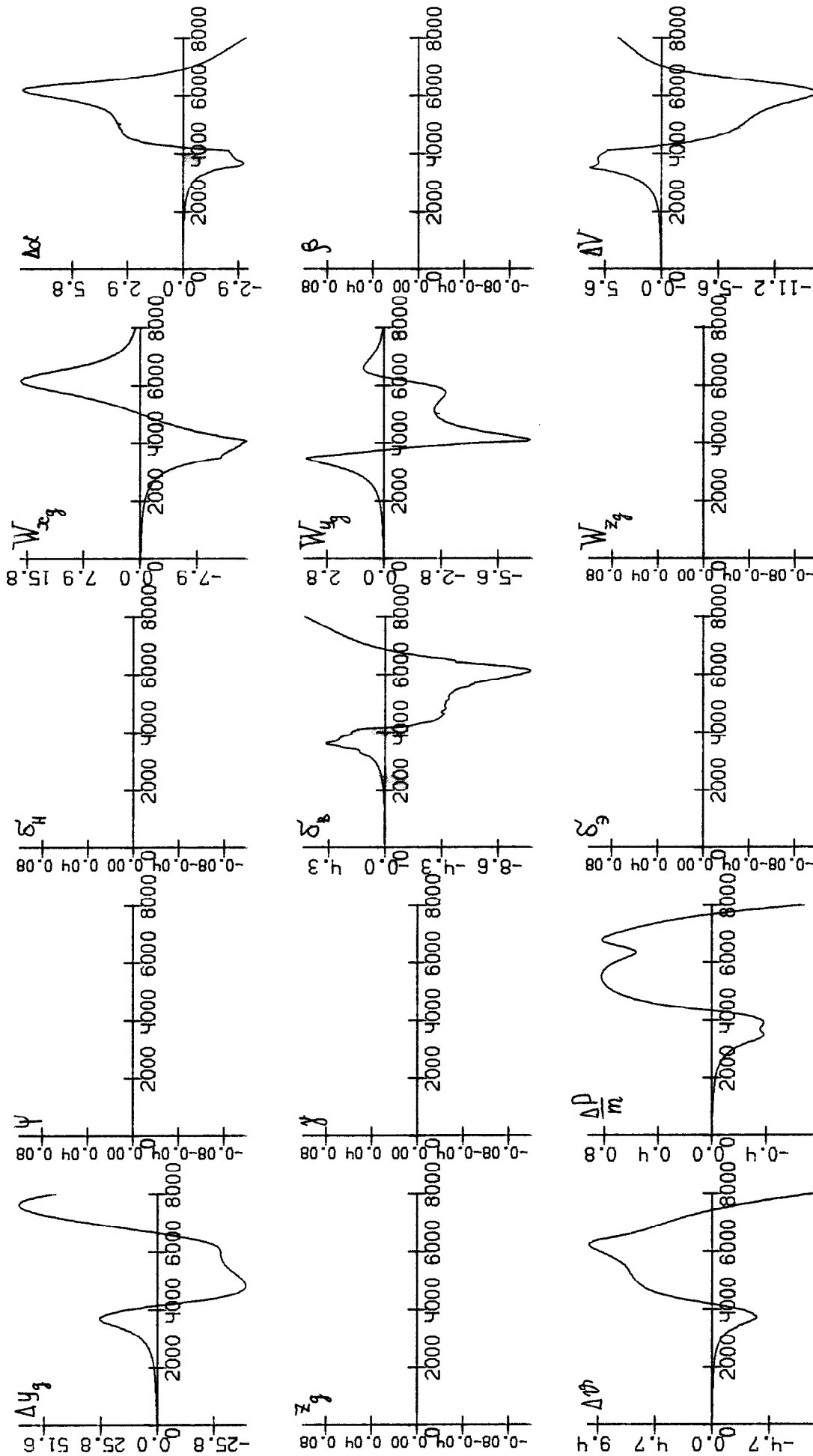


Рис. 3.22

Реализации при игровом способе (микровзрыв: $V_0 = 10$ м/с, $H_0 = 600$ м, $R_0 = 1200$ м, $DX = 5000$ м, $DZ = 0$ м)

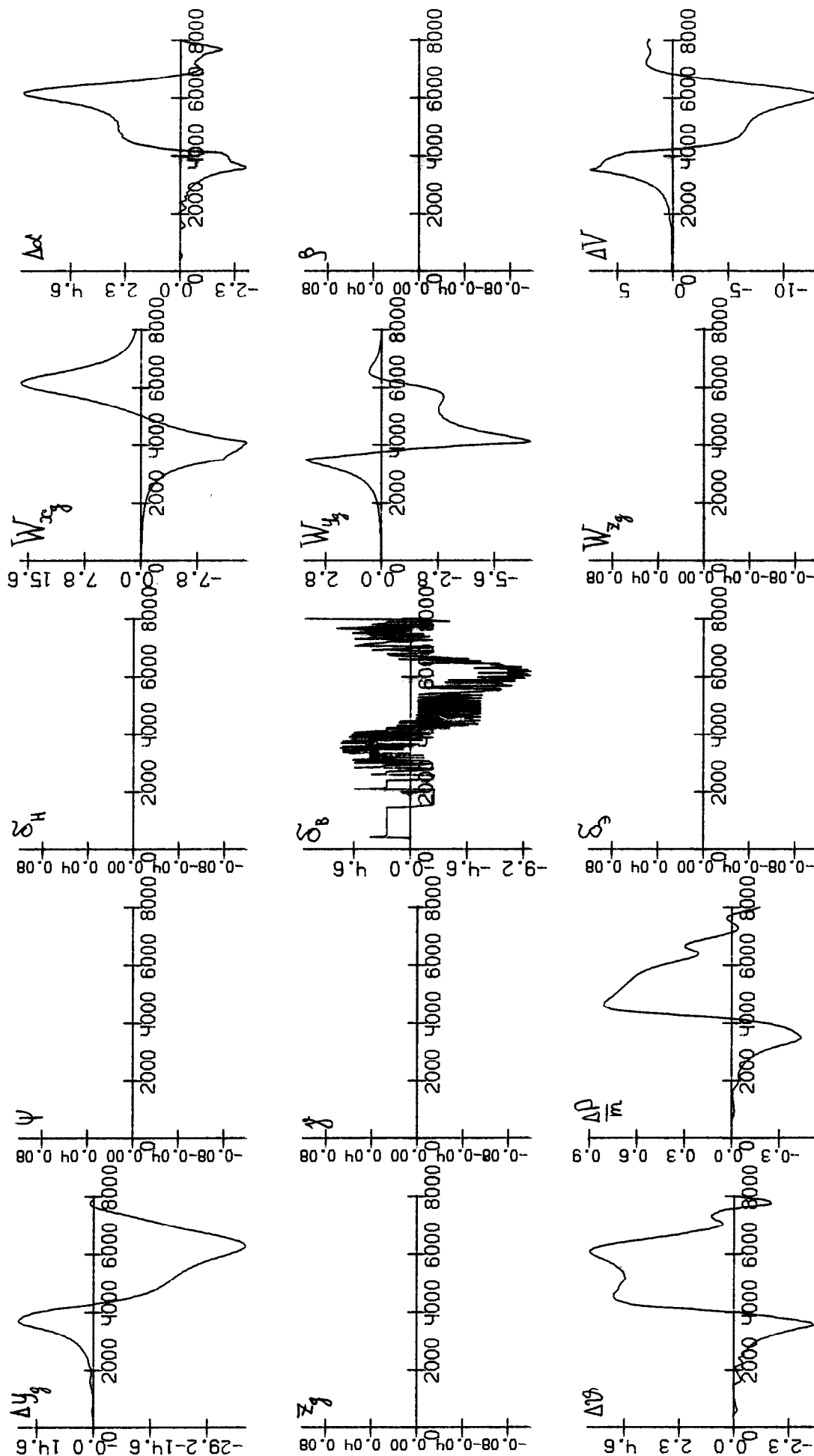


Рис. 3.23

Реализации при действующем слособе (микровзрыв: $V_0 = 10$ м/с, $H_0 = 600$ м, $R_0 = 1200$ м, $DK = 5000$ м, $DZ = 500$ м)

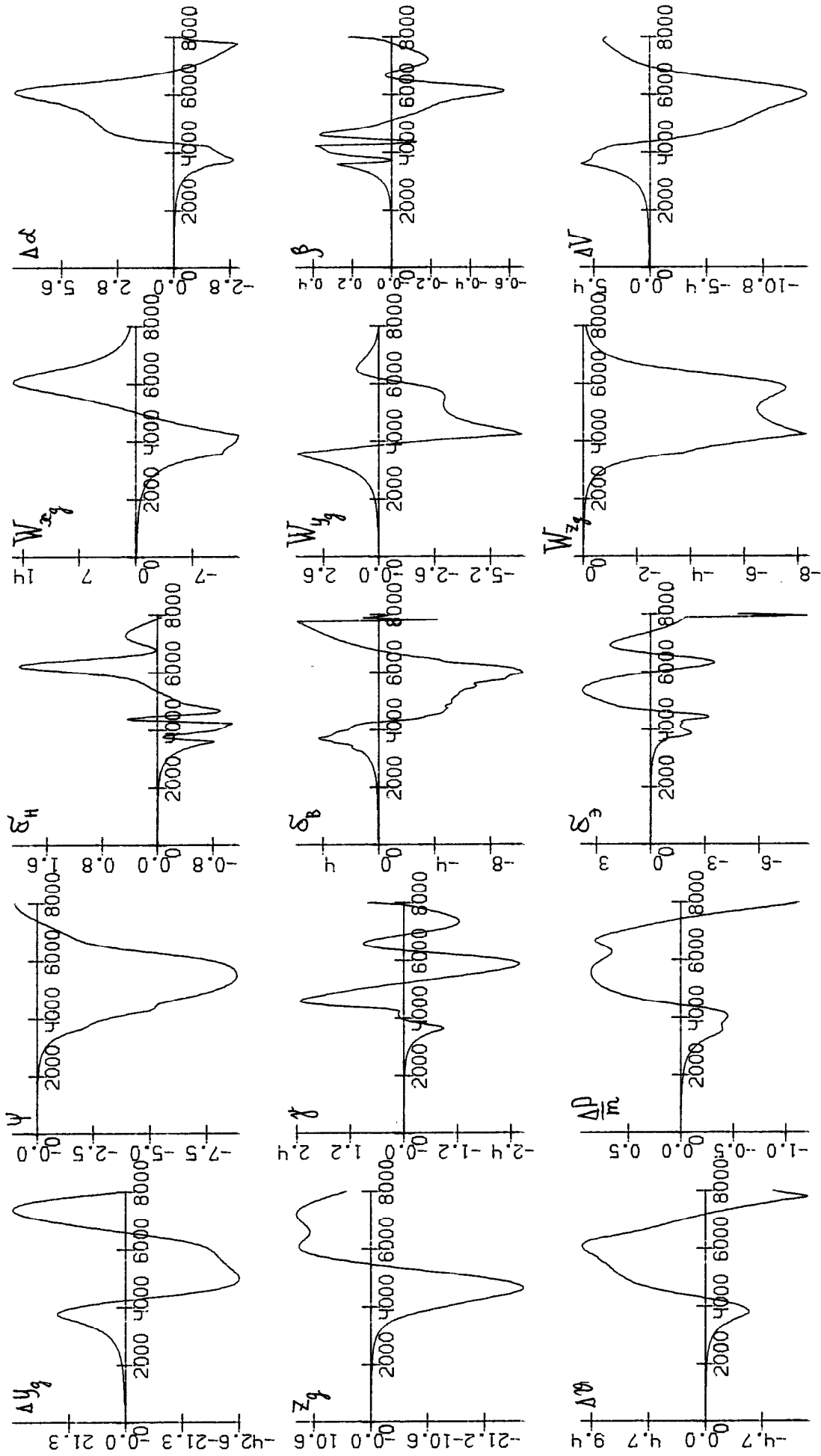


Рис. 3.24

Реализации при игровом способе (микровзрыв: $VO = 10$ м/с, $HO = 600$ м, $RO = 1200$ м, $DX = 5000$ м, $DZ = 500$ м)

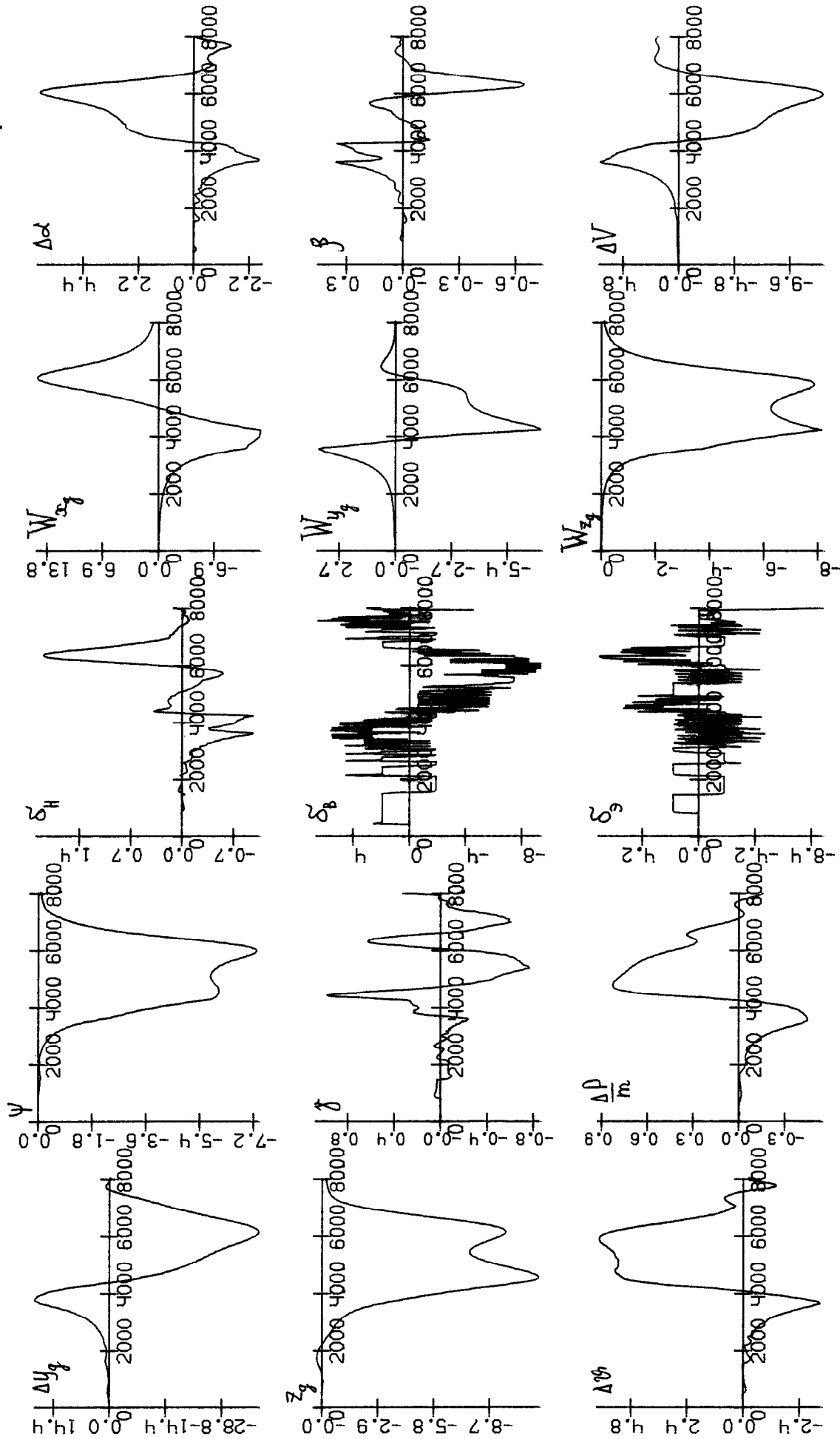


Рис. 3.25

реализации при действующем способе (микрозрыв: $V_0 = 10$ м/с, $H_0 = 600$ м, $R_0 = 1200$ м, $DX = 3000$ м, $DZ = 0$ м)

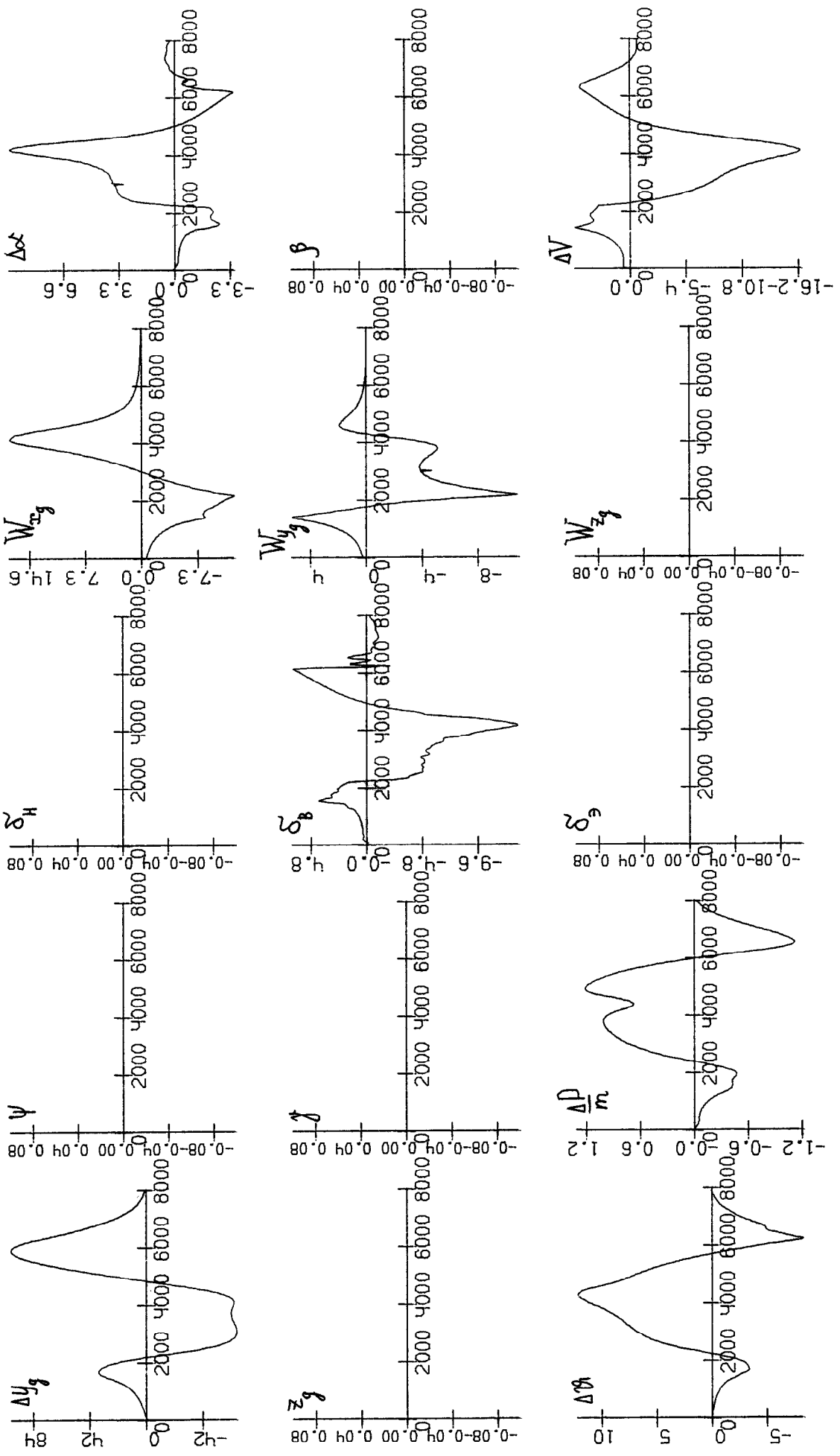


Рис. 3.26

Реализации при игровом способе (микровзрыв: $V_0 = 10$ м/с, $H_0 = 600$ м, $R_0 = 1200$ м, $DX = 3000$ м, $DZ = 0$ м)

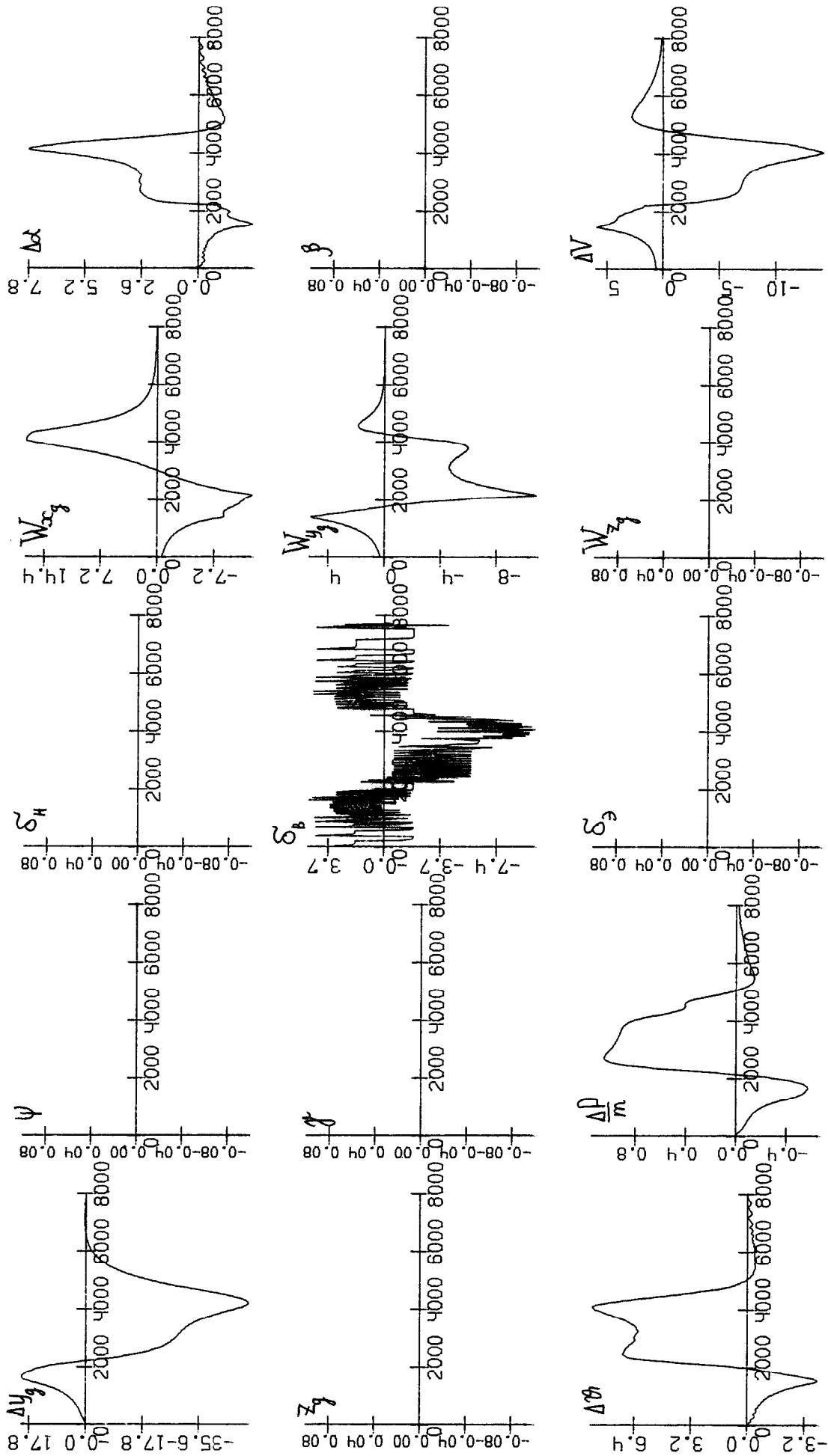


Рис.3.27

Реализации при действующем способе (микровзрыв: $V_0 = 10$ м/с, $H_0 = 600$ м, $R_0 = 1200$ м, $DZ = 3000$ м, $DZ = 500$ м)

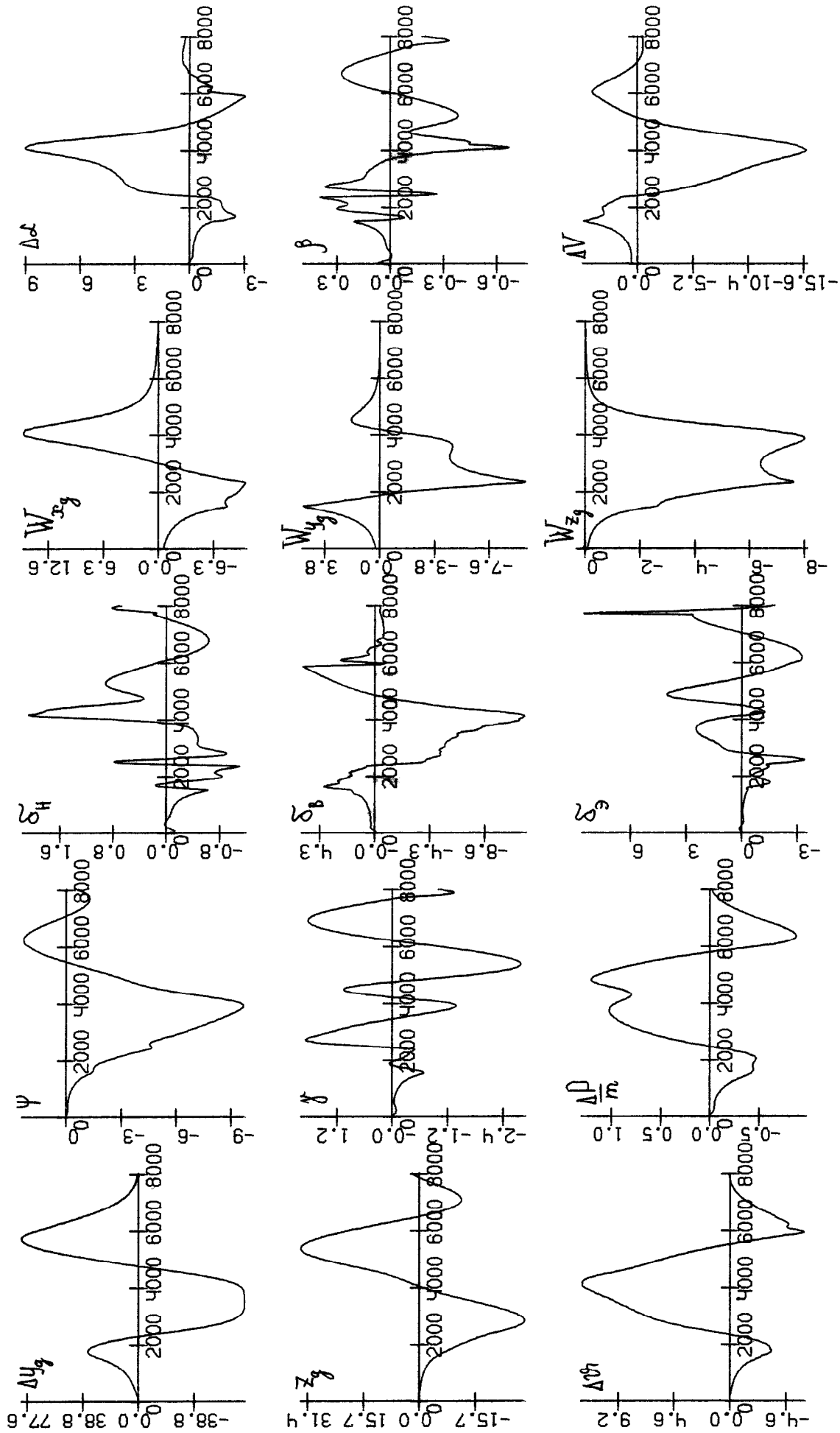


Рис. 3.28

Реализации при игровом способе (микровэрв: $VO=10$ м/с, $HO=600$ м, $RO=1200$ м, $DX=3000$ м, $DZ=500$ м)

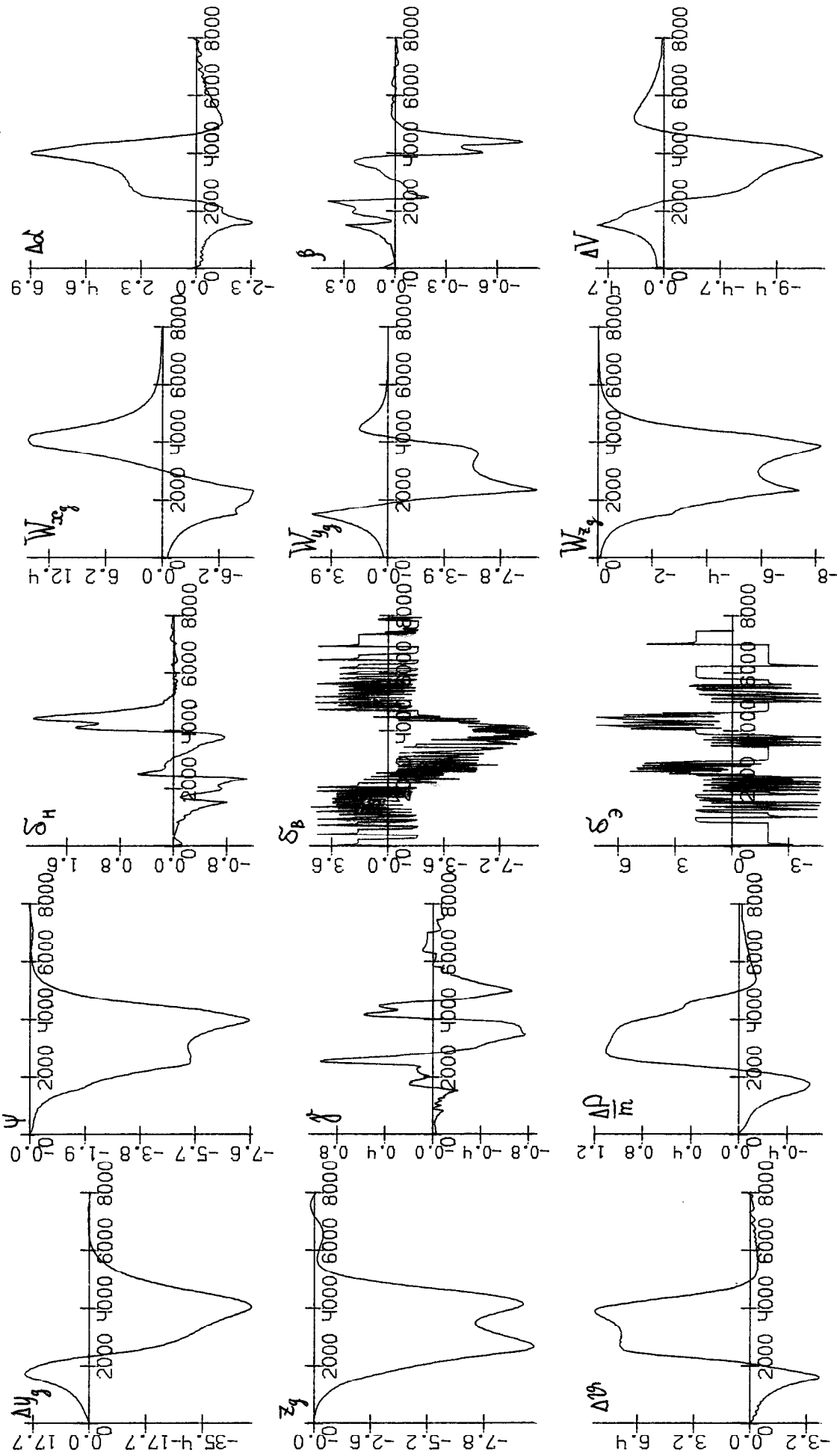


Рис. 3.29

Результаты моделирования показывают, что наибольшие отклонения Δy_g , $\Delta z_g = z_g$ возникают при втором варианте микровзрыва. Во всех случаях игровой способ управления I_{II} парирует ветровое возмущение лучше, чем способ I_A . Для сравнения отклонений Δy_g , Δz_g при способах I_A , I_{II} сделаны рис. 3.10, 3.11. Они соответствуют первому варианту параметров микровзрыва и вариантам в), д) расположения его центра. Реализации компонент скорости ветра на этих рисунках отвечают управлению I_{II} . Для управления I_A ветровые реализации практически те же самые.

Сделаем два замечания.

1) Как уже говорилось, при моделировании использовалась нелинейная система движения самолета на посадке, такая же, как в /I/. Небольшое отличие состоит в следующем: коэффициент $m_x^{\delta_z} = -0,00125$ заменен на $m_x^{\delta_z} = -0,0004$ (уменьшена эффективность элеронов); в дифференциальном уравнении для δ_{PZ} в действующем способе перед правой частью вставлен коэффициент 0.52 (увеличена инерционность автомата тяги).

2) Линии переключения для формирования $\delta_{\Delta z}$ и $\delta_{\Delta z}$ в игровом способе взяты те же, что и в /I/. Они соответствуют ограничениям 10 м/с, 5 м/с, 10 м/с на отклонения продольной, вертикальной и боковой компонент скорости ветра. Из приведенных графиков видно, что во многих случаях снимаемые с микровзрыва компоненты скорости ветра существенно превышали указанные пределы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчете приведены результаты моделирования процесса посадки в условиях сдвига ветра, возникающего при прохождении самолета зоны микровзрыва. Применяемая модель микровзрыва весьма проста и может быть использована в летных тренажерах, а также в устройствах имитации ветрового возмущения при испытании новой аппаратуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Разработка численных методов построения экстремальных ветровых возмущений, действующих на самолёт на этапе посадки. Анализ применения методов теории дифференциальных игр для имитации ветровых возмущений: Отчёт о НИР (промежуточ.)/Институт математики и механики УрО АН СССР; Руководитель В.С.Пацко.- ; № ГР 1880003467; Инв.№ 0288.0 044271 .- Свердловск, 1987.-46с.: ил.- Отв.исполн. В.С.Пацко, Н.Д.Боткин.-Библиогр.: с.44-46.
2. Красовский Н.Н., Субботин А.И. Позиционные дифференциальные игры. М.: Наука, 1974. 456с.
3. Ivan M. A ring-vortex downburst model for real time flight simulation of severe wind shears.- AIAA Flight Simulation technologies conf., 1985, July 22-24. St. Louis, Miss., 1985, p. 57-61.
4. Дитенберггер М.А., Хейнс П.А., Луэрс Дж.К. Реконструкция условий авиакатастрофы в Новом Орлеане.-Аэрокосмическая техника, 1986, № 5, с.3-15.
5. Лернер Э. Коварный сдвиг ветра будет побежден.-Аэрокосмическая техника, 1987, № 3, с.20-24.
6. Лернер Э. Оперативное средство защиты от сдвига ветра.- Аэрокосмическая техника, 1987, № 3, с.25-26.
7. Кейн В.М., Париков А.Н., Смуров М.Ю. Об одном способе оптимального управления по методу экстремального прицеливания,- ПММ, 1980, т.44, вып.3, с.434-440.
8. Титовский И.Н. Игровой подход к задаче синтеза управления самолетом при заходе на посадку.-Ученые записки ЦАГИ, 1981, т.ХП, № I, с.85-92.

9. Кузьмин В.П., Ярошевский В.А. Оценка предельных отклонений параметров траекторий самолета при автоматической посадке.- Ученые записки ЦАГИ, 1984, № 2, т.ХУ, с.43-56.
- Ю. Боткин Н.Д., Кейн В.М., Пацко В.С. Модельная задача об управлении боковым движением самолета на посадке.-ПММ, 1984, т.48, вып.4, с.560-567.
- И. Корнеев В.А., Меликян А.А., Титовский И.Н. Стабилизация глиссады самолета при ветровых возмущениях в минимаксной постановке.- Изв.АН СССР. Техн.кибернетика, 1985, № 3, с.132-139.
12. Miele A., Wang T., Melvin W. Optimal take-off trajectories in the presence of windshears.- *J. Opt. Theory and Appl.*, 1986, v.49, N1, p.1-45.

Приложение (текст программы)

МОДЕЛЬ МИКРОВЗРЫВА

в программе использован алгоритм из статьи:
 "A ring-vortex downburst model for real-time
 flight simulation off severe wind shears"

правила обращения к программе
 CALL VV(X,Y,Z,WX,WY,WZ,VO,HO,RO)

x,y,z -координаты интересующей нас точки:

x=xg-xc, y=yg-yc, z=zg-zc

wx,wy,wz -скорости в этой точке

vo,ho,ro -характеристики микровзрыва

n/программа определения скорости ветра в произвольной точке

SUBROUTINE VV(X,Y,Z,WX,WY,WZ,VO,HO,RO)

rc -радиус ядра микровзрыва

RC=SQRT((ABS(R)-RO)**2+(ABS(Y)+HO)**2)

rd -расстояние от центра ближайшего ядра до исследуемой точки

rd=sqrt(((abs(r)-ro)**2+(abs(y)-ho)**2)

проверка : находится ли исследуемая точка в ядре

IF (RD-RC) 21,22,22

реализация варианта -точка в ядре

21 Q=RD/RC

IF (Q) 24,23,24

(r1,h1) -вектор центр ядра -исследуемая точка

24 R1=R-SIGN(RO,R)

H1=Y-SIGN(HO,Y)

CALL WAP(VO,HO,RO,SIGN(HO,Y)+H1/Q,SIGN(RO,R)+R1/Q,WR1,WZ1)

23 WR=Q*WR1

WY=Q*WZ1

GOTO 25

реализация варианта -исследуемая точка вне ядра.

22 IF (ABS(R).LE.0.5) R=.5

CALL WAP(VO,HO,RO,Y,R,WR,WY)

25 WZ=WR*Z/R

WX=WR*X/R

WY=-WY

RETURN

END

вычисление вихревой функции str

FUNCTION STR(HO,RO,Y,R)

COMMON/CIR/CIR

вычисление расстояний r

R1=SQRT((Y-HO)**2+(R-RO)**2)

R2=SQRT((Y+HO)**2+(R-RO)**2)

R3=SQRT((Y-HO)**2+(R+RO)**2)

R4=SQRT((Y+HO)**2+(R+RO)**2)

вычисление коэффициентов rk

RK1=((R3-R1)/(R3+R1))**2

RK2=((R4-R2)/(R4+R2))**2

```

вычисление приближений эллиптических интегралов
  AR=.788*RK1/ (.25+.75*SQRT(1-RK1))
  AM=.788*RK2/ (.25+.75*SQRT(1-RK2))
  вычисление вихревой функции
  STR=-SIR*((R1+R3)*AR-(R2+R4)*AM)/6.2831852
  RETURN
  END
определение направления ветра по вихревой функции вне ядра
  SUBROUTINE WAF (VO,HO,RO,Y,R,WR,WY)
  d-дельта, применяемая при вычислении производной
  d=.2
вычисление радиальной и вертикальной составляющих скорости ветра
  STR1=STR(HO,RO,Y,R)
  WY=(STR1-STR(HO,RO,Y,R+D))/(R*D)
  WR=(STR(HO,RO,Y-D,R)-STR1)/(R*D)
  RETURN
  END

```