

ISSN 2073-8315



В Е С Н І К

Магілёўскага дзяржаўнага
універсітэта
імя А.А. Куляшова

НАВУКОВА-МЕТАДЫЧНЫ ЧАСОПІС

Выдаецца са снежня 1998 года

Серыя В. ПРЫРОДАЗНАЎЧЫЯ НАВУКІ
(матэматыка, фізіка, біялогія)

Выходзіць два разы ў год

2 (36)
2010

Галоўная рэдакцыйная калегія:

д-р філас. навук прафесар М.І. Вішнеўскі (галоўны рэдактар);
д-р гіст. навук прафесар Я.Р. Рыер (нам. галоўнага рэдактара);
канд. фіз.-мат. навук дацэнт Б.Д. Чабатарэўскі (нам. галоўнага рэдактара);
д-р фіз.-мат. навук прафесар С.В. Жасткоў (старшыня рэдакцыйнага савета серыі В);
Л.І. Будкова (адказны сакратар)

Матэматыка, фізіка:

д-р фіз.-мат. навук прафесар У.І. Лебедзеў (Магілёў)
д-р фіз.-мат. навук прафесар А.І. Таўтень (Мінск)
д-р фіз.-мат. навук прафесар В.А. Еравенка (Мінск)
канд. фіз.-мат. навук дацэнт А.А. Самадураў (Мінск)
канд. фіз.-мат. навук дацэнт С.М. Чарноў (Магілёў)

Біялогія:

д-р біял. навук прафесар М.В. Мапчанка (Магілёў)
д-р біял. навук прафесар Н.П. Максімава (Мінск)
канд. біял. навук дацэнт М.В. Акуліч (Магілёў)
д-р мед. навук Н.І. Сімчанка (Магілёў)
д-р мед. навук дацэнт А.В. Марачкаў (Магілёў)
д-р геагр. навук прафесар П.С. Лопух (Мінск)
д-р хім. навук прафесар Г.М. Раганаў (Мінск)
д-р хім. навук прафесар А.Г. Палячонак (Магілёў)

ЗМЕСТ

ЖЕСТКОВ С.В., РОМАНЕНКО А.А. Об исследовании новых форм волновых решений двумерных уравнений Фишера и Лотки-Вольтерра	4
ОСТРИКОВ О.М. Пластическая деформация аморфных сплавов на железной основе	15
ТИМОЩЕНКО (ГЛАЗУНОВА) Е.В., ЮРЕВИЧ В.А. Трансформация коротких оптических импульсов при отражении тонким нелинейным слоем	26
КОТЯШЕВ Е.О. Компьютерное моделирование когерентного взаимодействия ультракороткого лазерного импульса с активной средой	35
АКУЛИЧ Н.В., КРУЧИНСКИЙ Н.Г., ЛИВИНСКАЯ В.А., МЕЛЬНОВ С.Б. Диагностика предвестников атеросклероза в детской популяции	42
ПЕТРЕНЕВ Д.Р. Изменения в окислительном метаболизме перитонеальных макрофагов у молодых крыс при длительном воздействии излучения сотовых телефонов стандарта GSM 900 MHz	58
МАТВЕЙЧУК Ю.В., ВИШНЕВСКАЯ С.М., МАКСЕ Л.П., ЯСИНЕЦКИЙ В.В., ТОМОВ А.В. Изучение термолита гидроксосоединений цинка методами ТГ, ДТА, ДСК	69
ХАДАНОВИЧ А.В., СВИРИДЕНКО В.Г., ДРОЗДОВА Н.И. Распределение ионов свинца и кадмия в системе почва – растение в условиях Гомельского региона	76
ЗВЕСТКИ ПРА АЎТАРАЎ	85
SUMMARIES	87

МАТЭМАТЫКА, ФІЗІКА, БІЯЛОГІЯ

УДК 517+530.1

С.В. ЖЕСТКОВ, А.А. РОМАНЕНКО

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ НОВЫХ ФОРМ ВОЛНОВЫХ РЕШЕНИЙ ДВУМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ ФИШЕРА И ЛОТКИ-ВОЛЬТЕРРА

Известно [1-21], что уравнения Фишера и Лотки-Вольтерра играют важную роль в моделировании широкого круга задач биологии, химии, социологии. Центральное место при этом занимают вопросы, связанные с существованием точных волновых решений нелинейных уравнений параболического типа и разработкой методов их построения. В настоящей работе излагается прямой метод из [16] применительно к двумерным уравнениям Фишера и Лотки-Вольтерра.

I. Известно, что классические методы интегрирования нелинейных уравнений в частных производных, например, метод обратной задачи рассеяния (МОЗР) или метод Хироты, а также их модификации, к указанным уравнениям не применимы. Некоторые классы точных решений построены с помощью методов группового анализа [12-15]. Тем не менее, вопрос о разработке общего метода интегрирования уравнений Фишера и Лотки – Вольтерра остается открытым.

Рассмотрим двумерное уравнение Фишера [14]

$$u_t = D(u_{xx} + u_{yy}) + Au + \frac{B}{1-u}(u_x^2 + u_y^2) + Ku^2, \quad D > 0 \quad (1)$$

с произвольными действительными коэффициентами и краевыми условиями Неймана

$$u_x(t, x, y)|_{x \rightarrow \pm\infty} = 0, \quad u_y(t, x, y)|_{y \rightarrow \pm\infty} = 0. \quad (2)$$

Краевые условия (2) являются типичными при моделировании биологических процессов (см. [13]). На основе прямого метода из [16] решение задачи (1), (2) будем строить в виде

$$u(t, x, y) = 1 - F^{-1}(\xi), \quad \xi = \alpha t + \beta x + \gamma y + \varphi, \quad (3)$$

где $F(\xi)$ – неизвестная функция одной переменной, $\alpha, \beta, \gamma, \varphi$ – произвольные действительные числа. Подставляя (3) в (1), получим

$$F^3(A + K) - F^2(A + 2K) + F(K - \alpha F' + Dp^2 F'') - 2Dp^2 (F')^2 + Bp^2 (F')^2 = 0, \quad (4)$$

$$p^2 = \beta^2 + \gamma^2.$$

Уравнение (4) – это нелинейное уравнение второго порядка. Его решение, с учетом (2), будем строить в виде

$$F(\xi) = a + b \exp(\xi), \quad (5)$$

где $a > 0, b > 0$ неизвестные параметры. Подставляя (5) в (4), получим следующие соотношения:

$$a = 1, \quad B = 2D, \quad A + K = 0, \quad K + \alpha = p^2 D. \quad (6)$$

Таким образом, справедлива

Теорема 1. Для того чтобы уравнение (4) имело решение (5), необходимо и достаточно, чтобы выполнялись соотношения (6).

На основании теоремы 1 устанавливаем следующий результат.

Теорема 2. Пусть выполнены условия (6). Тогда задача (1), (2) имеет решение вида (3), (5), которое удовлетворяет начальному условию

$$u(0, x, y) = 1 - [1 + b \exp(\beta x + \gamma y + \varphi)]^{-1},$$

причем параметр $b > 0$ является произвольным.

На рис. 1 представлен график решения задачи (1), (2)

$$u(\xi) = 1 - [1 + b \exp(\xi)]^{-1}$$

при следующих значениях параметров: $A = 1.0, B = 2.0, D = 1.0, K = -1.0, \alpha = 3.0, \beta = 1.0, \gamma = 1.0, \varphi = 0, b = 1.0$.

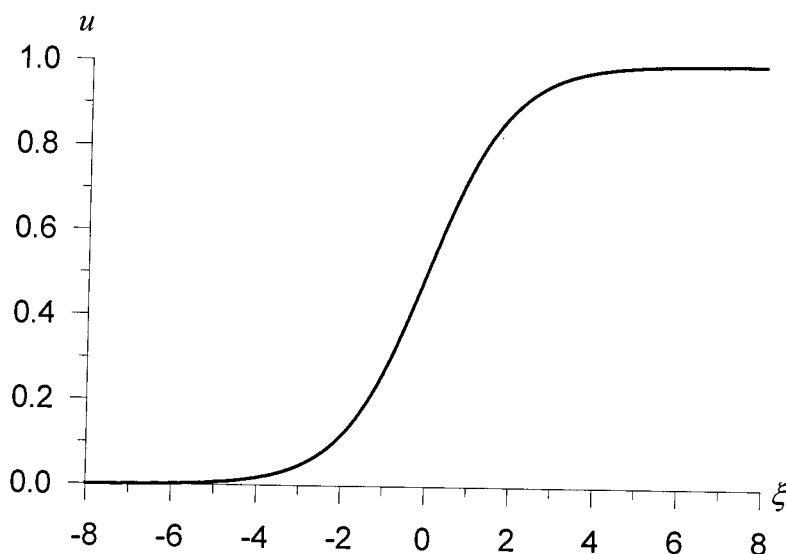


Рис. 1

II. Рассмотрим систему Лотки-Вольтерра

$$u_t = D(u_{xx} + u_{yy}) + \frac{B}{1-u} (u_x^2 + u_y^2) + u(a_1 - b_1 u - c_1 v), \quad D > 0, \quad (7)$$

$$v_t = D(v_{xx} + v_{yy}) + \frac{B}{1-v} (v_x^2 + v_y^2) + v(a_2 - b_2u - c_2v), \quad D > 0 \quad (8)$$

с произвольными действительными коэффициентами и краевыми условиями

$$\begin{aligned} u_x(t, x, y)|_{x \rightarrow \pm\infty} = 0, \quad u_y(t, x, y)|_{y \rightarrow \pm\infty} = 0, \\ v_x(t, x, y)|_{x \rightarrow \pm\infty} = 0, \quad v_y(t, x, y)|_{y \rightarrow \pm\infty} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Исследование системы (7), (8) сведем к одному уравнению Фишера вида (1). С этой целью положим, что

$$v(t, x, y) = \lambda_0 + \lambda_1 u(t, x, y), \quad (10)$$

где $\lambda_0 \neq 0, \lambda_1 \neq 0$ (см. [13]). Подставляя (10) в (7), (8), получим одно уравнение Фишера (1), если выполняются условия

$$\begin{aligned} \lambda_0 = \frac{a_2}{c_2}, \quad \lambda_1 = 1 - \lambda_0, \quad (b_1 - b_2)c_2 = (c_2 - c_1)(c_2 - a_2), \\ a_1 - a_2 = \left(\frac{c_1}{c_2} - 2 \right) a_2 - \frac{a_2 b_2}{c_2 - a_2}. \end{aligned} \quad (11)$$

При этом коэффициенты A, K определяются формулами

$$A = a_1 - \frac{c_1 a_2}{c_2}, \quad K = \frac{c_1 a_2}{c_2} - b_1 - c_1.$$

Применяя теорему 2, устанавливаем следующий результат.

Теорема 3. Пусть выполнены условия (11) и, кроме того,

$$a = 1, \quad B = 2D, \quad a_1 = b_1 + c_1, \quad p^2 D = \alpha + \frac{c_1 a_2}{c_2} - a_1.$$

Тогда краевая задача (7) – (9) имеет решение

$$u(t, x, y) = 1 - [1 + b \exp(\xi)]^{-1}, \quad v(t, x, y) = \lambda_0 + \lambda_1 u(t, x, y),$$

которое удовлетворяет начальному условию

$$u(0, x, y) = 1 - [1 + b \exp(\beta x + \gamma y + \varphi)]^{-1}, \quad v(0, x, y) = \lambda_0 + \lambda_1 u(0, x, y),$$

причем параметр $b > 0$ является произвольным. Графики функций $u(\xi)$, $v(\xi)$, которые являются решением задачи (7) – (9), приведены на рис. 2 при следующих значениях параметров: $B = 2.0$, $D = 1.0$, $a_1 = 2.0$, $b_1 = -2.0$, $c_1 = 4.0$, $a_2 = 0.5$, $b_2 = -0.5$, $c_2 = 1.0$, $b = 1.0$, $\alpha = 1.0$,

$\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}, \gamma = \frac{1}{\sqrt{2}}, \varphi = 0, \lambda_0 = 0.5, \lambda_1 = 0.5$. Кривая 1 соответствует функции $u(\xi)$, кривая 2 – функции $v(\xi)$.

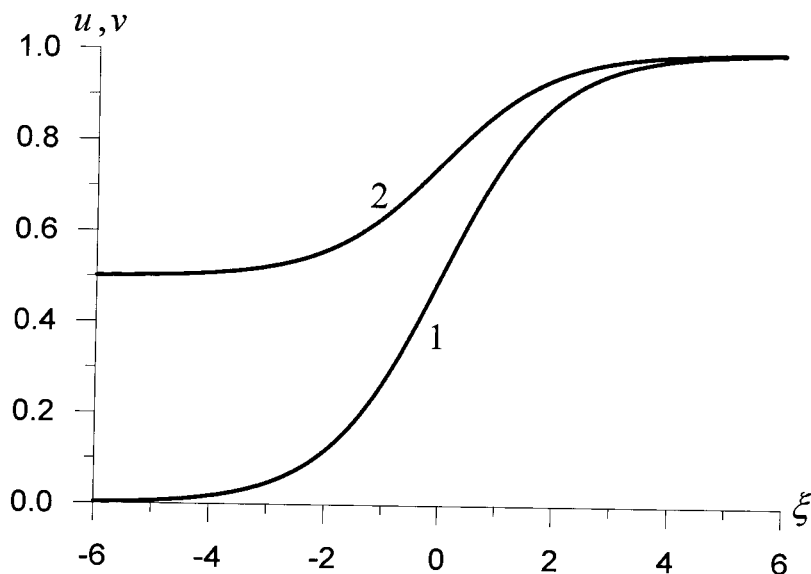


Рис. 2

III. Рассмотрим двумерное уравнение Фишера (ср. с [14])

$$u_t = D(u_{xx} + u_{yy}) + Au + \frac{B}{1-u}(u_x^2 + u_y^2) + Ru_x + Qu_y + Ku^2, \quad D > 0 \quad (12)$$

с произвольными действительными коэффициентами и краевыми условиями Неймана (2). Решение уравнения (12) будем строить в виде (3). Подставляя (3) в (12), получим

$$F^3(A+K) - F^2(A+2K) + F[K + (\beta R + \gamma Q - \alpha)F' + Dp^2F''] + p^2(B-2D)(F')^2 = 0. \quad (13)$$

Решение уравнения (13), с учетом краевых условий (2), строится в виде

$$F(\xi) = a + b \exp(\xi) + d \exp(-\xi), \quad (14)$$

где $a > 0, b > 0, d > 0$ – неизвестные параметры волн. Подставляя (14) в (13), найдем

$$\begin{aligned} A + K = 0, \quad \alpha = R\beta + \gamma Q, \quad p^2(B - D) = K, \quad a(3D - 2B) = D - B, \\ 4bd(2D - B) = (a^2 - a)(B - D). \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, справедлива

Теорема 4. Для того чтобы уравнение (13) имело решение вида (14), необходимо и достаточно, чтобы выполнялись соотношения (15).

На основании теоремы 4 устанавливаем следующий результат.

Теорема 5. Пусть выполнены условия (15). Тогда задача (12), (2) имеет решение вида (3), (14), которое удовлетворяет начальному условию

$$u(0, x, y) = 1 - [a + b \exp(\beta x + \gamma y + \varphi) + d \exp(-\beta x - \gamma y - \varphi)]^{-1}.$$

График решения задачи (12), (2)

$$u(\xi) = 1 - [a + b \exp(\xi) + d \exp(-\xi)]^{-1}$$

представлен на рис. 3 при следующих значениях параметров: $A = -0.8$, $B = 1.0$, $D = 0.6$, $K = 0.8$, $R = 2.0$, $Q = -1.0$, $\beta = 1.0$, $\gamma = 1.0$, $\alpha = 1.0$, $a = 2.0$, $b = d = 1.0$.

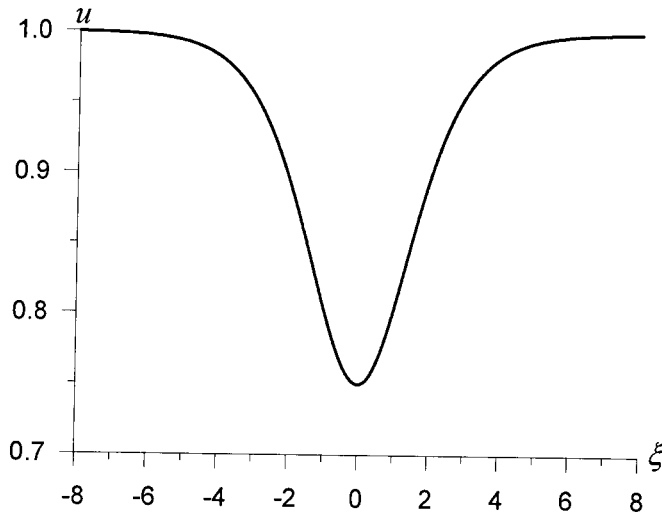


Рис. 3

IV. Задача (12), (2) допускает также решение вида

$$u(t, x, y) = 1 - F^{-2}(\xi), \quad F(\xi) = a + b \exp(\xi) + d \exp(-\xi). \quad (16)$$

Подставляя (16) в уравнение (12), найдем

$$F^4(A + K) - F^2(A + 2K) + 2(R\beta + \gamma Q - \alpha)FF' + 2Dp^2FF'' + p^2(4B - 6D)(F')^2 + K = 0, \quad (17)$$

и, следовательно,

$$A + K = 0, \quad \alpha = R\beta + \gamma Q, \quad 4B = 5D, \quad p^2D = K, \quad 4bd = a^2 - 1. \quad (18)$$

Таким образом, справедлива

Теорема 6. Для того чтобы уравнение (17) имело решение вида

$$F(\xi) = a + b \exp(\xi) + d \exp(-\xi),$$

необходимо и достаточно, чтобы выполнялись соотношения (18).

На основании теоремы (6) устанавливаем следующий результат.

Теорема 7. Пусть выполнены условия (18). Тогда задача (12), (2) имеет решение вида (16), которое удовлетворяет начальному условию

$$u(0, x, y) = 1 - [a + b \exp(\beta x + \gamma y + \varphi) + d \exp(-\beta x - \gamma y - \varphi)]^{-2}.$$

На рис. 4 представлен график решения задачи (12), (2)

$$u(\xi) = 1 - [a + b \exp(\xi) + d \exp(-\xi)]^{-2}$$

при следующих значениях параметров: $A = -0.8$, $B = 0.5$, $D = 0.4$, $K = 0.8$, $R = 2.0$, $Q = -1.0$, $\beta = 1.0$, $\gamma = 1.0$, $\alpha = 1.0$, $a = 2.0$,

$$b = d = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

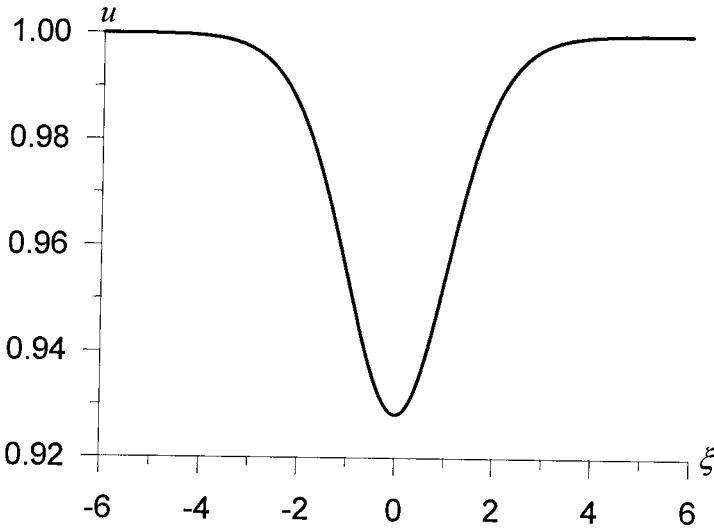


Рис. 4

V. Рассмотрим систему Лотки-Вольтерра

$$u_t = D(u_{xx} + u_{yy}) + \frac{B}{1-u} (u_x^2 + u_y^2) + R_1 u_x + R_2 v_x + Q_1 u_y + Q_2 v_y + u(a_1 - b_1 u - c_1 v), \quad (19)$$

$$D > 0,$$

$$v_t = D(v_{xx} + v_{yy}) + \frac{B}{1-v} (v_x^2 + v_y^2) + R_3 v_x + R_4 u_x + Q_3 v_y + Q_4 u_y + v(a_2 - b_2 v - c_2 u) \quad (20)$$

с произвольными действительными коэффициентами и краевыми условиями Неймана (9). Сведем систему (19), (20) к одному уравнению вида (12). Для этого положим, что

$$v(t, x, y) = \lambda_0 + \lambda_1 u(t, x, y), \quad \lambda_0 \neq 0, \quad \lambda_1 \neq 0.$$

Тогда при выполнении условий

$$\lambda_0 = \frac{a_2}{c_2}, \quad \lambda_1 = 1 - \frac{a_2}{c_2}, \quad R_1 - R_3 = \frac{R_4 c_2}{c_2 - a_2} - \frac{R_2 (c_2 - a_2)}{c_2}, \quad (21)$$

$$Q_1 - Q_3 = \frac{Q_4 c_2}{c_2 - a_2} - \frac{Q_2 (c_2 - a_2)}{c_2}, \quad a_1 + a_2 = \frac{c_1 a_2}{c_2} - \frac{b_2 a_2}{c_2 - a_2},$$

$$(b_1 - b_2)c_2 = (c_2 - c_1)(c_2 - a_2)$$

система (19), (20) приводится к одному уравнению вида (12), в котором

$$A = a_1 - \frac{c_1 a_2}{c_2}, \quad R = R_1 + \left(\frac{c_2 - a_2}{a_2} \right) R_2, \quad Q = Q_1 + \left(\frac{c_2 - a_2}{a_2} \right) Q_2,$$

$$K = -b_1 - c_1 + \frac{c_1 a_2}{c_2}.$$

Применяя теорему (5), устанавливаем следующий результат.

Теорема 6. Пусть выполнены условия (21) и, кроме того,

$$a_1 = b_1 + c_1, \quad \alpha = \beta \left[R_1 + \left(\frac{c_2 - a_2}{a_2} \right) R_2 \right] + \gamma \left[Q_1 + \left(\frac{c_2 - a_2}{a_2} \right) Q_2 \right],$$

$$p^2(B - D) = \frac{c_1 a_2}{c_2} - a_1, \quad a(3D - 2B) = D - B, \quad 4bd(2D - B) = (a^2 - a)(B - D).$$

Тогда краевая задача (19), (20), (9) имеет решение

$$u(t, x, y) = u(\xi) = 1 - [a + b \exp(\xi) + d \exp(-\xi)]^{-1},$$

$$v(t, x, y) = v(\xi) = \lambda_0 + \lambda_1 u(t, x, y),$$

которое удовлетворяет начальному условию

$$u(0, x, y) = 1 - [a + b \exp(\beta x + \gamma y + \varphi) + d \exp(-\beta x - \gamma y - \varphi)]^{-1},$$

$$v(t, x, y) = v(\xi) = \lambda_0 + \lambda_1 u(\xi).$$

VI. Из пункта IV следует, что система (19), (20) может иметь решение

$$u(t, x, y) = 1 - [a + b \exp(\xi) + d \exp(-\xi)]^{-2} = u(\xi), \quad (22)$$

$$v(t, x, y) = \lambda_0 + \lambda_1 u(\xi) = v(\xi)$$

при выполнении условий (21) и следующих соотношений:

$$a_1 = b_1 + c_1, \quad \alpha = \beta \left[R_1 + \left(\frac{c_2 - a_2}{a_2} \right) R_2 \right] + \gamma \left[Q_1 + \left(\frac{c_2 - a_2}{a_2} \right) Q_2 \right], \quad (23)$$

$$p^2 D = \frac{c_1 a_2}{c_2} - a_1, \quad 4B = 5D, \quad 4bd = a^2 - 1.$$

Таким образом, справедлива

Теорема 7. Пусть выполнены условия (21) и (23). Тогда краевая задача (19), (20), (9) имеет решение вида (22), которое удовлетворяет начальному условию

$$u(0, x, y) = 1 - [a + b \exp(\beta x + \gamma y + \varphi) + d \exp(-\beta x - \gamma y - \varphi)]^{-2},$$

$$v(0, x, y) = \lambda_0 + \lambda_1 u(0, x, y).$$

VII. Рассмотрим двумерное уравнение Фишера с кубической нелинейностью

$$u_t = D(u_{xx} + u_{yy}) + Au + \frac{B}{1-u} (u_x^2 + u_y^2) + Ru_x + Qu_y + Ku^2 + Hu^3, \quad D > 0, \quad (24)$$

с произвольными коэффициентами и краевыми условиями (2). Решение уравнения (24) будем строить в виде (16). Подставляя (16) в (24), получим нелинейное уравнение

$$2\alpha F^3 F' = Dp^2 [2F^3 F'' - 6F^2 (F')^2] + A[F^6 - F^4] + 2(R\beta + Q\gamma)F^3 F' + 4p^2 B F^2 (F')^2 + K[F^6 - 2F^4 + F^2] + H[F^6 - 3F^4 + 3F^2 - 1] \quad (25)$$

и, следовательно,

$$\alpha = R\beta + \gamma Q, \quad 4(B - D)p^2 = 2K + 3H + A, \quad p^2(4B - 3D) = 2(2K + 3H + A),$$

$$-(6a^2 + 4bd)(2K + 3H + A) + 2Dp^2(3a^2 + 4bd) + (4B - 6D)p^2 a^2 + K + 3H = 0,$$

$$-(2a^2 + 6bd)(2K + 3H + A) + Dp^2(a^2 + 9bd) - bdp^2(4B - 6D) + K + 3H = 0, \quad (26)$$

$$a^4 + 12a^2 bd + 6b^2 d^2 + 12Dp^2(a^2 bd + b^2 d^2) - 2bdp^2(4B - 6D)(bd + a^2) + (a^2 + 2bd)(K + 3H) - H = 0.$$

Таким образом, справедлива

Теорема 8. Для того чтобы уравнение (25) имело решение вида (16), необходимо и достаточно, чтобы выполнялись соотношения (26).

На основании теоремы 8 устанавливаем следующий результат.

Теорема 9. Пусть выполнены условия (26). Тогда краевая задача (24), (2) имеет решение вида (16), которое удовлетворяет начальному условию

$$u(0, x, y) = 1 - [a + b \exp(\beta x + \gamma y + \varphi) + d \exp(-\beta x - \gamma y - \varphi)]^{-2}.$$

График решения задачи (24), (2) $u(\xi) = 1 - F^{-2}(\xi)$ представлен на рис. 5 при следующих значениях параметров: $A=1.2$, $B=0.625$, $D=0.5$, $K=-0.57564372$, $H=0.31709581$, $\beta=1.0$, $\gamma=1.0$, $p=\sqrt{2}$, $a=1.0$, $b=d_l=0.39508109$.

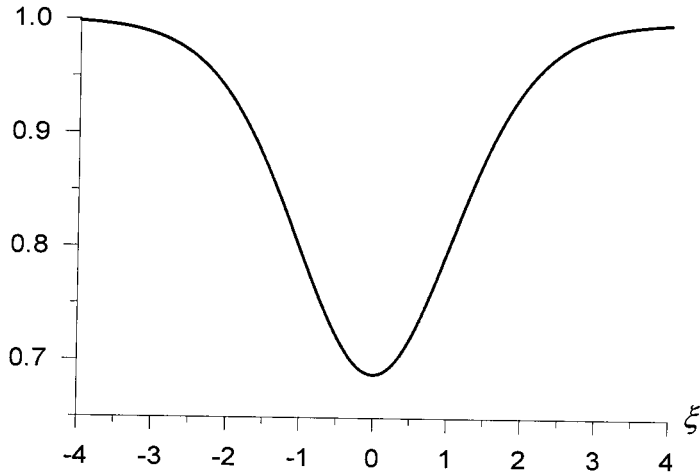


Рис. 5

VIII. Исследуем на основе уравнения (24) систему Лотки-Вольтерра с квадратичными и кубическими членами

$$\begin{aligned} u_t = D(u_{xx} + u_{yy}) + \frac{B}{1-u} (u_x^2 + u_y^2) + R_1 u_x + R_2 v_x + Q_1 u_y + Q_2 v_y + a_1 u^2 + a_2 uv + \\ + a_3 v^2 + b_1 u^3 + b_2 u^2 v + b_3 uv^2 + b_4 v^3, \quad D > 0, \\ v_t = D(v_{xx} + v_{yy}) + \frac{B}{1-v} (v_x^2 + v_y^2) + R_3 v_x + R_4 u_x + Q_3 v_y + Q_4 u_y + c_1 u^2 + c_2 uv + \\ + c_3 v^2 + d_1 u^3 + d_2 u^2 v + d_3 uv^2 + d_4 v^3 \end{aligned} \quad (27)$$

с произвольными коэффициентами и краевыми условиями (9). Сведем систему (27) к одному уравнению вида (24) с помощью подстановки

$$v(t, x, y) = \lambda_0 + \lambda_1 u(t, x, y), \quad \lambda_0 \neq 0, \quad \lambda_1 \neq 0.$$

Тогда при выполнении соотношений

$$\lambda_0 + \lambda_1 = 1, \quad R_1 + \lambda_1 R_2 = R_3 + \frac{R_4}{\lambda_1}, \quad Q_1 + \lambda_1 Q_2 = Q_3 + \frac{1}{\lambda_1} Q_4,$$

$$\begin{aligned}
 a_2\lambda_0 + 3\lambda_0^2\lambda_1a_3 + b_3\lambda_0^2 + 3b_4\lambda_0^2\lambda_1 &= \frac{1}{\lambda_1}c_2\lambda_0 + 2c_3\lambda_0 + \frac{1}{\lambda_1}d_3\lambda_0^2 + 3d_4\lambda_0^2, \\
 a_1 + a_2\lambda_1 + 3a_3\lambda_1^2\lambda_0 + b_2\lambda_0 + 2\lambda_0\lambda_1b_3 + 3b_4\lambda_0\lambda_1^2 &= \\
 &= \frac{1}{\lambda_1}c_1 + c_2 + c_3\lambda_1 + \frac{1}{\lambda_1}d_2\lambda_0 + 2d_3\lambda_0 + 3d_4\lambda_0\lambda_1, \\
 a_3\lambda_1^3 + b_1 + b_2\lambda_1 + b_3\lambda_1^2 + b_4\lambda_1^3 &= \frac{1}{\lambda_1}d_1 + d_2 + d_3\lambda_1 + d_4\lambda_1^2
 \end{aligned} \tag{28}$$

система (27) сведется к одному уравнению вида (24) с коэффициентами $R = R_1 + \lambda_1 R_2 \equiv R^*$, $Q = Q_1 + \lambda_1 Q_2 \equiv Q^*$, $A = a_2\lambda_0 + 3\lambda_0^2\lambda_1a_3 + b_3\lambda_0^2 + 3b_4\lambda_0^2\lambda_1 \equiv A^*$,

$$\begin{aligned}
 K &= a_1 + a_2\lambda_1 + 3a_3\lambda_0\lambda_1^2 + b_2\lambda_0 + 2\lambda_0\lambda_1b_3 + 3b_4\lambda_0\lambda_1^2 \equiv K^*, \\
 H &= a_3\lambda_1^3 + b_1 + b_2\lambda_1 + b_3\lambda_1^2 + b_4\lambda_1^3 \equiv H^*.
 \end{aligned}$$

На основании теоремы 9 устанавливаем следующий результат.

Теорема 10. Пусть выполнены условия (28) и, кроме того,

$$\begin{aligned}
 \alpha &= R^* \beta + \gamma Q^*, \quad 4(B-D)p^2 = S^*, \quad p^2(4B-3D) = 2S^*, \\
 -(6a^2 + 4bd)S^* + 2Dp^2(3a^2 + 4bd) + (4B-6D)p^2a^2 + K^* + 3H^* &= 0, \\
 -(2a^2 + 6bd)S^* + Dp^2(a^2 + 9bd) - bdp^2(4B-6D) + K^* + 3H^* &= 0, \\
 a^4 + 12a^2bd + 6b^2d^2 + 12Dp^2(a^2bd + b^2d^2) - 2bdp^2(4B-6D)(bd + a^2) + \\
 + (a^2 + 2bd)(K^* + 3H^*) - H^* &= 0, \quad S^* \equiv 2K^* + 3H^* + A^*.
 \end{aligned}$$

Тогда краевая задача (27), (9) имеет решение вида

$$\begin{aligned}
 u(t, x, y) &= 1 - F^{-2}(\xi), \quad F(\xi) = a + b \exp(\xi) + d \exp(-\xi), \\
 v(t, x, y) &= \lambda_0 + \lambda_1 u(t, x, y),
 \end{aligned}$$

которое удовлетворяет начальному условию

$$\begin{aligned}
 u(0, x, y) &= 1 - [a + b \exp(\beta x + \gamma y + \varphi) + d \exp(-\beta x - \gamma y - \varphi)]^{-2}, \\
 v(0, x, y) &= \lambda_0 + \lambda_1 u(0, x, y).
 \end{aligned}$$

Таким образом, предложенный метод позволяет аналитически моделировать волновые решения двумерных уравнений Фишера и Лотки-Вольтерра с различными типами нелинейности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lotka, A.J.** Updated oscillations derived from the law of mass action / A.J. Lotka // J. Amer. Chem. Soc, 1920. – Vol. 42. – P. 1595-1599.
2. **Volterra, V.** Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi / V. Volterra // Mem. Acad. Lincei, 1926. – Vol. 2. – P. 31-113.
3. **Fisher, R.A.** The wave of advance of advantageous genes / R.A. Fisher // Ann. Eugenics, 1937. – Vol. 7. – P. 353-369.
4. **Колмогоров А.Н.** Исследование уравнения диффузии, соединенной с возрастаньем количества вещества, и его применение к одной биологической проблеме / А.Н. Колмогоров, И.Г. Петровский, Н.С. Пискунов // Бюллетень МГУ. Сер. А. Матем. и механика, 1937. – Т. 1. – С. 1-25.
5. **Canosa, J.** Diffusion in nonlinear multiplicative media / J. Canosa // J. Math. Phys, 1969. – Vol. 10. – P. 1862-1868.
6. **Aronson, D.G.** Partial differential equations and related topics / D.G. Aronson, H.F. Weinberger // Lecture Notes in Mathematics. Springer, 1975. – Vol. 446. – P. 5-49.
7. **Ablowitz, M.J.** Explicit solution of Fisher's equation for a special wave speed / M.J. Ablowitz, A. Zeppetella // Bull. Math. Biol, 1979. – Vol. 41. – P. 835-840.
8. **Shigesada, N.** Spatial segregation of interacting species / N. Shigesada, K. Kawasaki, E. Teramoto // J. Theor. Biol, 1979. – Vol. 79. – P. 83-99.
9. **Murray, J.D.** Mathematical biology / J.D. Murray. – Springer, 1989.
10. **Brazhnik, P.K.** Travelling waves and static structures in a two-dimensional exactly solvable reaction-diffusion system / P.K. Brazhnik, J.J. Tyson // J. Phys. A: Math. Gen, 1999. – Vol. 32. – P. 8033-8044.
11. **Brazhnik, P.K.** On travelling wave solutions of Fisher's equation in two spatial dimensions / P.K. Brazhnik, J.J. Tyson // SIAM. J. Appl. Math., 1999. – Vol. 60. – P. 371-391.
12. **Cherniha, R.** Lie symmetries of nonlinear two-dimensional reaction-diffusion systems / R. Cherniha // Rept. Math. Phys, 2000. – Vol. 46. – P. 63-76.
13. **Чернига, Р.М.** Нові точні розв'язки та їхні властивості одного нелінійного рівняння математичної біології / Р.М. Чернига // Укр. мат. журнал, 2001. – Т. 53. – № 10. – С. 1409-1421.
14. **Bindu, P.S.** Symmetries and integrability properties of generalized Fisher type nonlinear diffusion equation / P.S. Bindu, M. Lakshmanan // Proceedings of institute of mathematics of NAS of Ukraine, 2002. – Vol. 43. – Part 1. – P. 36-48.
15. **Чернига, Р.М.** Дифузійна система Лотки-Вольтерра: симетрії Лі, точні та числові розв'язки / Р.М. Чернига, В.А. Дутка // Укр. мат. журнал, 2004. – Т. 56. – № 10. – С. 1395-1404.
16. **Жестков, С.В.** Конструктивные методы построения глобальных решений нелинейных уравнений в частных производных / С.В. Жестков. – Могилев: МГУ им. А.А. Кулешова, 2006.
17. **Зайцев, В.Ф.** Справочник по дифференциальным уравнениям с частными производными: Точные решения. / В.Ф. Зайцев, А.Д. Полянин. – М.: Международная программа образования, 1996.
18. **Жестков, С.В.** О существовании новых форм волновых решений нелинейных уравнений математической биологии / С.В. Жестков, А.А. Романенко // Весці НАНБ. Сер. фіз.-мат. наук, 2010. – № 2. – С. 46-51.
19. **Мизохата, С.** Теория уравнений с частными производными / С. Мизохата. – М.: Мир, 1977.

20. **Сидоров, С.В.** Бегущие волны и динамический хаос в активных средах: численное исследование / С.В. Сидоров // Дифференц. уравнения, 2009. – Т. 45. – № 2. – С. 250-254.
21. **Баранник, А.Ф.** Про нелінійськи розв'язки нелінійного рівняння реакції-дифузії / А.Ф. Баранник, И.И. Юрик // Доп. Нац. АН. України, 2005. – № 2. – С. 11-17.

Поступила в редакцію 27.04.2010 г.

УДК 548.24

О.М. ОСТРИКОВ

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ

Методом локального деформирования изучены закономерности формирования полос сдвига в аморфных сплавах на основе железа. Предложены количественные характеристики для анализа характера пластической деформации аморфных сплавов. Рассмотрены механизмы формирования полос сдвига в полях напряжений индентора.

Введение

Стадийность процессов реализации деформирования твердых тел, обладающих пластичностью, предполагает, что пластическая деформация реализуется раньше, чем разрушение. Для стадии пластической деформации кристаллических твердых тел свойственно активное зарождение и развитие двойникования и скольжения, а стадии разрушения предшествует зарождение и развитие трещин. Естественно полагать, что и у аморфных материалов стадия разрушения будет связана с появлением микротрещин. Стадии же пластической деформации будут присущи некоторые специфические элементарные носители деформации, способствующие релаксации напряжений в местах их локализации. Согласно данным работ [1-3], такими носителями упругой энергии на стадии пластической деформации выступают полосы сдвига, которые по внешнему виду напоминают микротрещины, но по своей внутренней структуре существенно от них отличаются. Главное отличие полос сдвига от трещин заключается в наличии областей сцепления материала, находящегося по разные стороны плоскости сдвига [3].

Полосы сдвига в аморфных материалах на современном этапе изучения свойств конденсированных систем, не имеющих дальнего порядка, представляют большой научный интерес. В первую очередь потому, что в отличие, например, от двойникования и скольжения – основных каналов пластической деформации кристаллических твердых тел полосы сдвига в аморфных материалах мало изучены, что связано прежде всего с тем, что металлические стекла объектом всестороннего исследования стали сравнительно недавно. Поэтому представляется актуальной целью данной

работы, заключающаяся в изучении закономерностей формирования и развития полос сдвига у концентратора напряжений на поверхности аморфных сплавов на основе железа.

Методика эксперимента. Исследовались аморфные сплавы $\text{Fe}_{46.3}\text{-Cr}_{40}\text{-Mo}_{7.2}\text{-V}_{0.5}\text{-B}_{4.0}\text{-Si}_{2.0}$, $\text{Fe}_{81.4}\text{-Cr}_{4.0}\text{-Mo}_{6.0}\text{-Ni}_{5.2}\text{-C}_{1.0}\text{-Mn}_{2.1}\text{-Al}_{0.3}$, $\text{Fe}_{71.7}\text{-Ni}_{6.0}\text{-Co}_{2.4}\text{-Cr}_{7.5}\text{-Mo}_{7.9}\text{-B}_{4.0}\text{-Si}_{0.5}$, $\text{Fe}_{86}\text{-P}_{9.8}\text{-C}_{1.0}\text{-Si}_{0.9}\text{-Al}_{1.7}\text{-B}_{0.6}$ (в вес. %), которые были получены методом спиннингования на наружную поверхность закалочного диска. Скорость охлаждения составила $8 \cdot 10^5$ °C/с. Толщина лент имела порядок 70 мкм.

Рентгеноструктурный анализ проводился на ДРОН-3 в монохроматическом $\text{Cu K}\alpha$ -излучении.

Исследование закономерностей формирования полос сдвига у концентратора напряжения проводилось с помощью методики локального деформирования поверхности. В качестве концентратора напряжений выступала алмазная пирамида Виккерса стандартного прибора ПМТ-3. Испытаниям подвергались две стороны лент: сторона, контактировавшая при получении ленты с воздухом (сторона 1), и сторона, контактировавшая с медным диском-кристаллизатором (сторона 2). У отпечатка индентора наблюдались полосы сдвига двух типов (см. рис. 1): в виде лучей, идущих от отпечатка индентора, и в виде полуколец, окаймляющих индентор. Фиксировались следующие параметры: число лучей $N_{\text{л}}$, число полуколец $N_{\text{п}}$, длина лучей $L_{\text{л}}$ и удаленность полуколец от отпечатка индентора $L_{\text{п}}$ (по нормали к грани индентора).

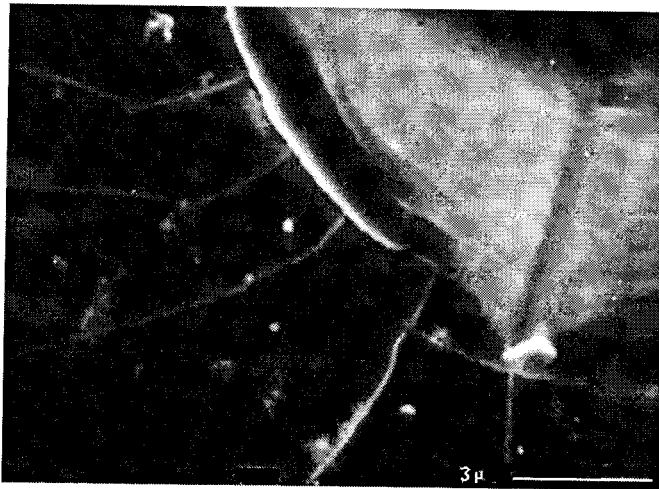


Рис. 1. Деформационная картина, возникающая у отпечатка индентора на поверхности аморфного сплава на основе железа.
Снимок сделан с помощью CamScan-4

Исследования велись в интервале нагрузок на индентор от 0,25 до 1,5 Н. Для проверки наличия возможности формирования полос сдвига типа лучей у сплавов $\text{Fe}_{81.4}\text{-Cr}_{4.0}\text{-Mo}_{6.0}\text{-Ni}_{5.2}\text{-C}_{1.0}\text{-Mn}_{2.1}\text{-Al}_{0.3}$, $\text{Fe}_{71.7}\text{-Ni}_{6.0}\text{-Co}_{2.4}\text{-}$

$\text{Cr}_{7.5}\text{-Mo}_{7.9}\text{-B}_{4.0}\text{-Si}_{0.5}$, $\text{Fe}_{86}\text{-P}_{9.8}\text{-C}_{1.0}\text{-Si}_{0.9}\text{-Al}_{1.7}\text{-B}_{0.6}$ производился контроль при нагрузках от 2 Н и выше.

Результаты и их обсуждение. Рентгеноструктурный анализ показал, что исследуемые сплавы рентгеноаморфны. Это проявилось в типичном уширении пика, соответствующего плоскости (110) α – (Fe, Si). Другие пики на рентгенограмме отсутствовали.

На рис. 2 а и б представлены экспериментально полученные зависимости числа полос сдвига, типа полуколец от нагрузки на индентор для двух сторон лент. Для большинства рассматриваемых сплавов в исследованном интервале нагрузок данная зависимость линейная. У сплава $\text{Fe}_{46.3}\text{-Cr}_{40}\text{-Mo}_{7.2}\text{-V}_{0.5}\text{-B}_{4.0}\text{-Si}_{2.0}$ при малых нагрузках N_n растет, а при нагрузке, близкой к 1,0 Н, убывает.

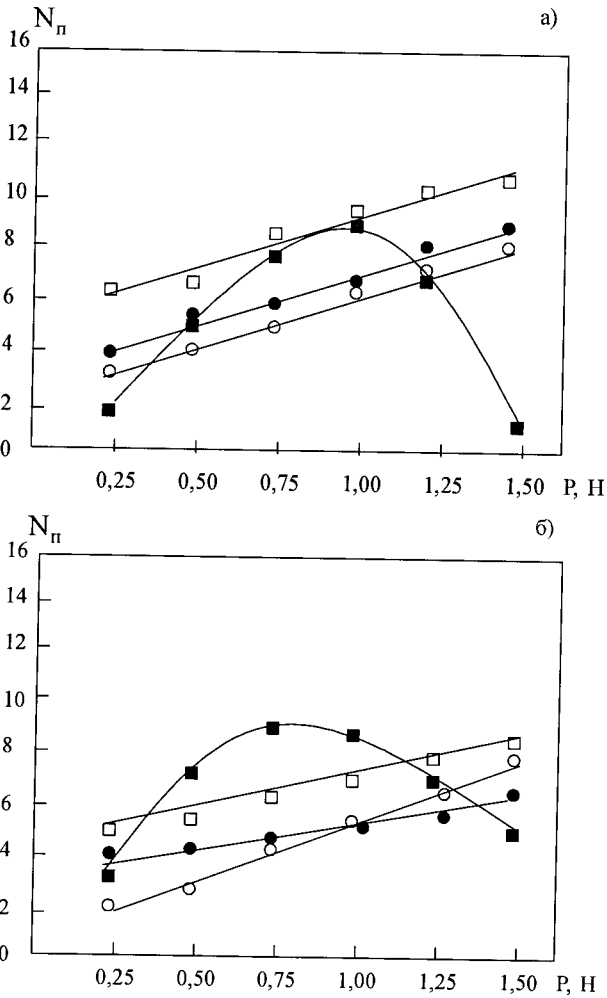


Рис. 2. Зависимость среднего числа полос сдвига типа полуколец от нагрузки на индентор: а) сторона 1; б) сторона 2; ■ – $\text{Fe}_{46.3}\text{-Cr}_{40}\text{-Mo}_{7.2}\text{-V}_{0.5}\text{-B}_{4.0}\text{-Si}_{2.0}$; □ – $\text{Fe}_{81.4}\text{-Cr}_{4.0}\text{-Mo}_{6.0}\text{-Ni}_{5.2}\text{-C}_{1.0}\text{-Mn}_{2.1}\text{-Al}_{0.3}$; ● – $\text{Fe}_{71.7}\text{-Ni}_{6.0}\text{-Co}_{2.4}\text{-Cr}_{7.5}\text{-Mo}_{7.9}\text{-B}_{4.0}\text{-Si}_{0.5}$; ○ – $\text{Fe}_{86}\text{-P}_{9.8}\text{-C}_{1.0}\text{-Si}_{0.9}\text{-Al}_{1.7}\text{-B}_{0.6}$.

Аналогичный вид имеют и зависимости $L_n = f(P)$ (см. рис. 3 а и б).

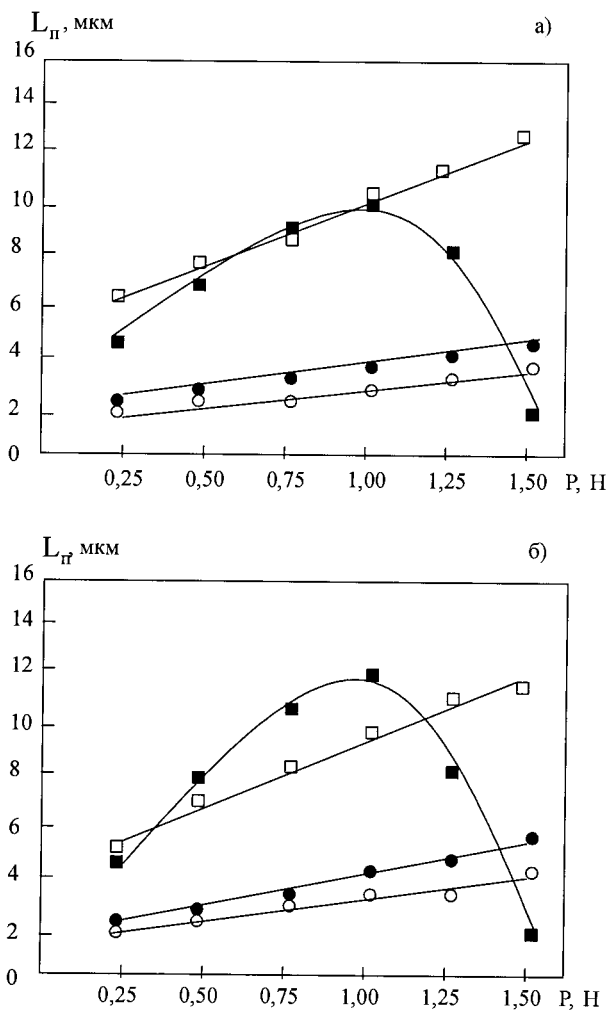


Рис. 3. Зависимость среднего удаления от грани индентора полос сдвига типа полуколец от нагрузки на индентор: а) сторона 1; б) сторона 2;
 ■ – $Fe_{46.3}-Cr_{40}-Mo_{7.2}-V_{0.5}-B_{4.0}-Si_{2.0}$; □ – $Fe_{81.4}-Cr_{4.0}-Mo_{6.0}-Ni_{5.2}-C_{1.0}-Mn_{2.1}-Al_{0.3}$;
 ● – $Fe_{71.7}-Ni_{6.0}-Co_{2.4}-Cr_{7.5}-Mo_{7.9}-B_{4.0}-Si_{0.5}$; ○ – $Fe_{86}-P_{9.8}-C_{1.0}-Si_{0.9}-Al_{1.7}-B_{0.6}$.

Аномальное поведение полос сдвига у концентратора напряжений на поверхности сплава $Fe_{46.3}-Cr_{40}-Mo_{7.2}-V_{0.5}-B_{4.0}-Si_{2.0}$ может быть объяснено перераспределением энергии деформирования между двумя каналами, такими как формирование полос сдвига в виде полуколец и в виде лучей. При нагрузке на индентор 1,0 Н, когда начинается спад кривых $N_n = f(P)$ и $L_n = f(P)$, у отпечатка индентора возникают полосы сдвига типа лучей (рис. 4). В результате меньше энергии идет на формирование полос сдвига типа полуколец из-за ее расхода на формирование

лучей. Этого не наблюдается у сплавов $Fe_{81,4}-Cr_{4,0}-Mo_{6,0}-Ni_{5,2}-C_{1,0}-Mn_{2,1}-Al_{0,3}$, $Fe_{71,7}-Ni_{6,0}-Co_{2,4}-Cr_{7,5}-Mo_{7,9}-B_{4,0}-Si_{0,5}$, $Fe_{86}-P_{9,8}-C_{1,0}-Si_{0,9}-Al_{1,7}-B_{0,6}$, так как формирование лучей у них начинается при нагрузках, близких к 2,0 Н, что выходит за область исследуемых нагрузок.

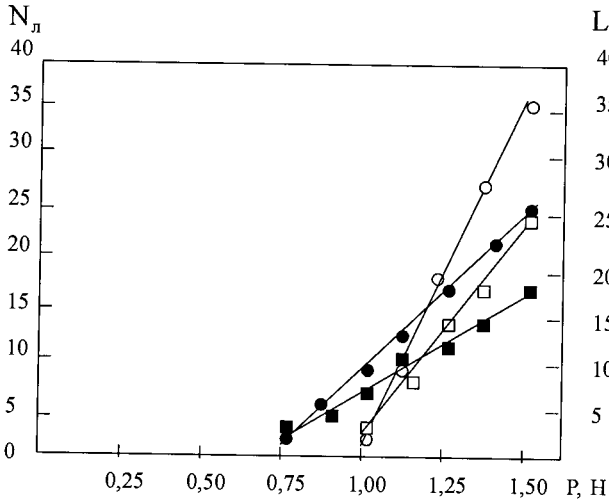


Рис. 4. Зависимость среднего числа и длины полос сдвига типа лучей от нагрузки на индентор у сплава $Fe_{46,3}-Cr_{40}-Mo_{7,2}-V_{0,5}-B_{4,0}-Si_{2,0}$:
 ● и ■ - $N_n = f(P)$, стороны 1 и 2 соответственно;
 ○ и □ - $L_n = f(P)$, стороны 1 и 2 соответственно

Следует отметить, что в данной работе решалась экспериментальная задача, схема которой представлена на рис. 5, где P – входной параметр, а N_n , N_l и L_n , L_l – выходные параметры. Другими словами, в качестве внешнего воздействия выступала контролируемая нагрузка на индентор, а в качестве отклика системы (в нашем случае аморфного материала) выступали измеряемые параметры N_n , N_l и L_n , L_l .

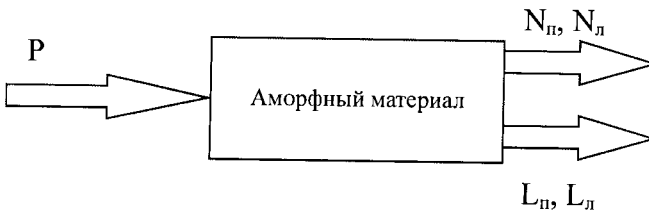


Рис. 5. Структурная схема эксперимента

Показанной на рис. 5 схеме в общем случае соответствует система уравнений:

$$\begin{aligned}
 N_n &= f_1(P); \\
 L_n &= f_2(P); \\
 N_l &= f_3(P); \\
 L_l &= f_4(P),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где функции $f_1(P)$, $f_2(P)$, $f_3(P)$ и $f_4(P)$ определяются на основании экспериментальных данных, приведенных на рис. 2, 3 и 4. Для сплавов $Fe_{81.4}-Cr_{4.0}-Mo_{6.0}-Ni_{5.2}-C_{1.0}-Mn_{2.1}-Al_{0.3}$, $Fe_{71.7}-Ni_{6.0}-Co_{2.4}-Cr_{7.5}-Mo_{7.9}-B_{4.0}-Si_{0.5}$, $Fe_{86}-P_{9.8}-C_{1.0}-Si_{0.9}-Al_{1.7}-B_{0.6}$ функции $N_n = f_1(P)$ и $L_n = f_2(P)$ для каждой стороны ленты имеют вид

$$\begin{aligned} N_n &= A_1^i P + B_1^i; \\ L_n &= A_2^i P + B_2^i, \end{aligned} \quad (2)$$

а для сплава $Fe_{46.3}-Cr_{40}-Mo_{7.2}-V_{0.5}-B_{4.0}-Si_{2.0}$,

$$\begin{aligned} N_n &= A_{11}^i P^2 + B_{11}^i P + C_{11}^i; \\ L_n &= A_{22}^i P^2 + B_{22}^i P + C_{22}^i, \end{aligned} \quad (3)$$

где A_1^i , B_1^i , C_1^i , A_2^i , B_2^i , C_2^i , A_{11}^i , B_{11}^i , C_{11}^i , A_{22}^i , B_{22}^i и C_{22}^i – эмпирические коэффициенты, определяемые по данным, представленным на рис. 2 и 3; i – параметр, указывающий на отношение коэффициентов к тому или иному сплаву, а именно значение i , равное 1, соответствует сплаву $Fe_{81.4}-Cr_{4.0}-Mo_{6.0}-Ni_{5.2}-C_{1.0}-Mn_{2.1}-Al_{0.3}$, 2 – сплаву $Fe_{71.7}-Ni_{6.0}-Co_{2.4}-Cr_{7.5}-Mo_{7.9}-B_{4.0}-Si_{0.5}$, 3 – сплаву $Fe_{86}-P_{9.8}-C_{1.0}-Si_{0.9}-Al_{1.7}-B_{0.6}$ и 4 – сплаву $Fe_{46.3}-Cr_{40}-Mo_{7.2}-V_{0.5}-B_{4.0}-Si_{2.0}$.

Для сплава $Fe_{46.3}-Cr_{40}-Mo_{7.2}-V_{0.5}-B_{4.0}-Si_{2.0}$ система (3) должна быть дополнена соотношениями

$$\begin{aligned} N_n &= D_1 P - E_1; \\ L_n &= D_2 P - E_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь D_1 , E_1 , D_2 и E_2 – эмпирические коэффициенты.

Рассчитанные значения коэффициентов, фигурирующих в формулах (2), (3) и (4), представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Рассчитанные значения коэффициентов
в эмпирических выражениях (2)*

i	A_1^i, H^{-1}	B_1^i	$A_2^i, \text{мкм/Н}$	$B_2^i, \text{мкм}$
Fe-Cr-Mo-Ni-C-Mg-Al	$\frac{3,8}{2,4}$	$\frac{5,3}{4,8}$	$\frac{5,2}{5,6}$	$\frac{5,1}{4,0}$
	$\frac{3,6}{1,8}$	$\frac{3,2}{3,3}$	$\frac{2,4}{2,4}$	$\frac{2,1}{2,0}$
Fe-Ni-Co-Cr-Mo-B-Si	$\frac{1,8}{3,4}$	$\frac{2,3}{1,4}$	$\frac{1,2}{1,6}$	$\frac{1,8}{1,9}$

* Значение над чертой соответствует стороне 1, под чертой – стороне 2.

Таблица 2

**Рассчитанные значения коэффициентов
в эмпирических выражениях (3) и (4)***

i	A_{11}^i	B_{11}^i	C_{11}^i	A_{22}^i	B_{22}^i	C_{22}^i	D_1	E_1	D_2	E_2
	H^{-2}	H^{-1}		$\frac{\text{МКМ}}{H^2}$	$\frac{\text{МКМ}}{H}$	МКМ	H^{-1}		$\frac{\text{МКМ}}{H}$	МКМ
Fe-Cr-Mo-V-B-Si	$\frac{-6,9}{-6,5}$	$\frac{13,8}{13,0}$	$\frac{2,4}{2,3}$	$\frac{-7,7}{-10,0}$	$\frac{15,4}{20,0}$	$\frac{2,2}{1,7}$	$\frac{3,0}{2,3}$	$\frac{22,1}{17,2}$	$\frac{74,8}{50,5}$	$\frac{67,4}{40,3}$

* Значение над чертой соответствует стороне 1, под чертой – стороне 2.

Приведенные выше соотношения интересны в плане ввода количественных характеристик, удобных для анализа закономерностей формирования и развития полос сдвига. Так, например, могут быть определены зависимости между N_n и L_n , а также N_n и L_n . Для сплава $Fe_{81.4}-Cr_{4.0}-Mo_{6.0}-Ni_{5.2}-C_{1.0}-Mn_{2.1}-Al_{0.3}$, например, для стороны 1 зависимость $N_n = f(L_n)$ имеет вид

$$N_n = 0,7 L_n + 4,3. \tag{5}$$

Согласно данному соотношению для сплава системы $Fe_{81.4}-Cr_{4.0}-Mo_{6.0}-Ni_{5.2}-C_{1.0}-Mn_{2.1}-Al_{0.3}$ свойственна линейная связь между числом полос сдвига и их средней удаленностью от грани индентора. Это говорит о согласованности процессов формирования и развития полос сдвига типа полуколец.

Произведение среднего числа полос сдвига N_n или N_n на их длину даст среднюю суммарную длину полос сдвига, т.е.

$$\begin{aligned} \Sigma L_n &= N_n l_n; \\ \Sigma L_n &= N_n L_n. \end{aligned} \tag{6}$$

Здесь $l_n = \frac{\pi}{2} R$, а $R = L_n + r$ (где r – расстояние от центра отпечатка до грани). Нетрудно показать, что $r = h \operatorname{tg} \alpha$ (в этом выражении h – глубина проникновения индентора; α – угол при вершине индентора). Учитывая это, а также выражения (2) и (4), из (6) для сплавов $Fe_{81.4}-Cr_{4.0}-Mo_{6.0}-Ni_{5.2}-C_{1.0}-Mn_{2.1}-Al_{0.3}$, $Fe_{71.7}-Ni_{6.0}-Co_{2.4}-Cr_{7.5}-Mo_{7.9}-B_{4.0}-Si_{0.5}$, $Fe_{86}-P_{9.8}-C_{1.0}-Si_{0.9}-Al_{1.7}-B_{0.6}$ получим

$$\Sigma L_n = \frac{\pi}{2} (A_1^i P + B_1^i) (A_2^i P + B_2^i + h \operatorname{tg} \alpha). \tag{7}$$

Отсюда видно, что для указанных сплавов зависимость ΣL_n от P квадратичная, в то время как функция $L_n = f_1(P)$ линейная. Однако следует отметить, что квадратичный рост $\Sigma L_n = f(P)$ будет наблюдаться лишь в исследуемом интервале нагрузок на индентор.

В случае сплава $Fe_{46.3}-Cr_{40}-Mo_{7.2}-V_{0.5}-B_{4.0}-Si_{2.0}$ уравнения (6) будут иметь вид

$$\Sigma L_n = \frac{\pi}{2} (A_{11}^i P^2 + B_{11}^i P + C_{11}^i) (A_{22}^i P^2 + B_{22}^i P + C_{22}^i + h \operatorname{tg} \alpha);$$

$$\Sigma L_n = (D_1 P - E_1)(D_2 P - E_2). \quad (8)$$

В данном случае зависимость ΣL_n от P имеет четвертую степень, а $\Sigma L_n = f(P)$ квадратичная.

Интересны величины

$$\sigma_n = \frac{P}{(\Sigma L_n)^2};$$

$$\sigma_n = \frac{P}{(\Sigma L_n)^2}. \quad (9)$$

Они имеют размерность напряжений (Па или Н/м²). Поэтому им можно сопоставить физический смысл, который заключается в том, что σ_n и σ_n – это те части напряжений у индентора, которые релаксируют благодаря развитию полос сдвига, или напряжения, которые идут на формирование полос сдвига. Относительная доля этих напряжений может быть определена из формулы

$$\mu = \frac{\sigma - \beta_n \sigma_n - \beta_n \sigma_n}{\sigma} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где σ – напряжения, создаваемые индентором; β_n и β_n – безразмерные корреляционные множители.

Из (9) нетрудно получить

$$\varepsilon_n = \sigma_n / E';$$

$$\varepsilon_n = \sigma_n / E', \quad (11)$$

где ε_n и ε_n – относительные деформации; E' – модуль пластичности 1-го рода.

Если использовать дислокационный подход к описанию процесса формирования полос сдвига [3], то можно ввести следующее соотношение для линейной плотности дислокаций полосы сдвига:

$$\rho_n = \alpha_n n_n / L_n;$$

$$\rho_n = \alpha_n n_n / L_n, \quad (12)$$

где ρ_n и ρ_n – плотности дислокаций на полосах сдвига типа полуколец и лучей соответственно; n_n и n_n – число дислокаций; α_n и α_n – коэффициенты, учитывающие долю пор в полосе сдвига и области скопления дислокаций.

Подвижность дислокаций полос сдвига типа лучей можно определить средней длиной пробега всех дислокаций луча, которая равна половине длины луча, т.е.

$$\lambda = L_n / 2. \quad (13)$$

Интересны механизмы формирования полос сдвига у индентора. На рис. 6 показано распределение напряжений у индентора. Согласно данным работы [4] в области формирования полос сдвига (область ABCDE) материал находится в условиях всестороннего сжатия. Сдвиговые напряжения направлены под углом 45° к поверхности (см. левую часть рис. 6). Тогда действия нормальных σ и сдвиговых τ напряжений на полосы сдвига можно представить так, как это показано на рис. 7.

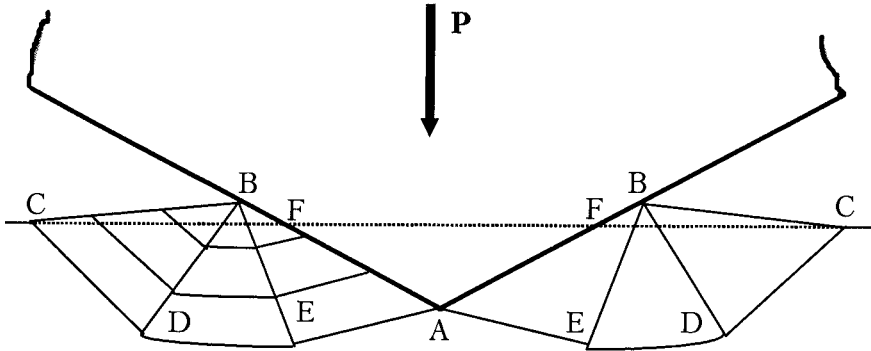


Рис. 6. Область пластической деформации у индентора и линии сдвига в ней [4]

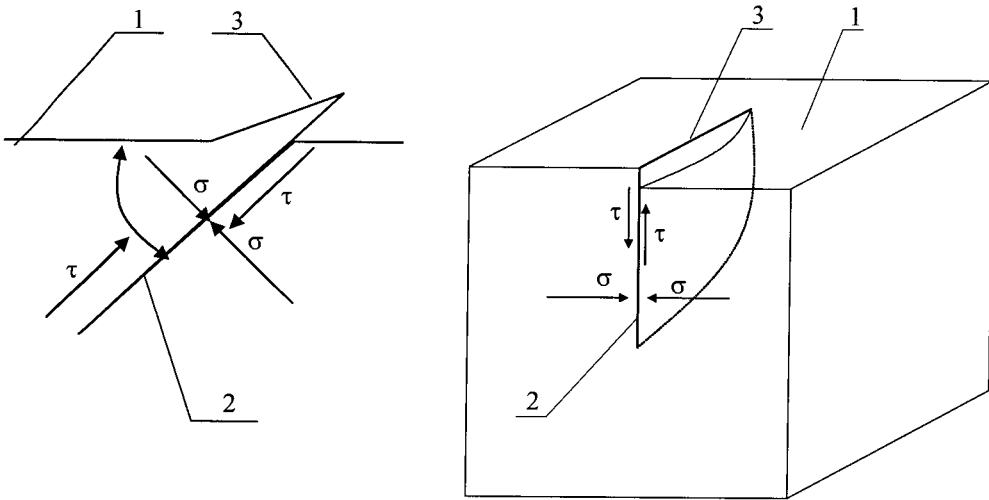


Рис. 7. Схема действия нормальных σ и скалывающих τ напряжений у индентора на полосы сдвига типа полуколец (а) и лучей (б): 1 – поверхность аморфного материала; 2 – полоса сдвига; 3 – чешуйка (а) или ступенька (б), наблюдаемые в микроскоп

В случае чешуйчатых навалов (такой вид при электронной микроскопии имеют полосы сдвига типа полуколец) скалывающие напряжения направлены к поверхности под углом 45° (см. рис. 7 а). Полосы сдвига развиваются вдоль направления максимальных сдвиговых напряжений, при этом на поверхности образуется своеобразная чешуйка. Нормальные напряже-

ния сжимают контактирующие части материала, расположенные по разные стороны плоскости сдвига.

Общеизвестно [3], что вдоль полос сдвига, еще на стадии пластической деформации аморфного материала, энергетически выгодно развитие трещин. Энергетическая выгода обусловлена специфическим строением полос сдвига в аморфном материале, которые по своей структуре больше напоминают цепочки пор в монокристалле. В нашем случае развитие трещин вдоль полос сдвига затруднено благодаря сжимающим напряжениям, в то время как для развития трещин необходимы раскрывающие напряжения, противоположные по направлению показанным на рис. 7. Поэтому энергетическая выгода развития трещин вдоль полос сдвига реализуется лишь при растяжении аморфных лент. В нашем случае это возможно лишь при наличии стопоров на пути развития полос сдвига, а также при их специфических формах, причем на отдельных участках полос при наличии раскрывающих напряжений (например, на изгибах полос).

Существуют работы, в которых рассматриваемые дефекты называют трещинами (см., например, [5]). При этом складывается впечатление о спорности представлений о природе дефектов, возникающих у отпечатка индентора [1-3]. Однако следует учитывать, что термин “полоса сдвига” в аморфных материалах несет иной смысл, чем в случае, например, монокристаллов. Полоса сдвига в аморфном материале, как уже отмечалось, по своей структуре существенно отличается от полосы сдвига в кристаллических телах. Отечественные авторы [3], дав название рассматриваемому дефекту “полоса сдвига”, обращали внимание на то, что определяющими в развитии данного дефекта являются сдвиговые напряжения, в то время как зарубежные авторы [5] подчеркивают близость этих образований к трещинам, а именно переходному состоянию от цепочек пор к трещине. При этом не учитывается рассмотренная в данной работе ситуация, когда на полосу сдвига действуют сжимающие напряжения и ее преобразование в трещину затруднено. Не учитывается также то, что при пересечении полосы сдвига проникают друг сквозь друга [1], что трещинам не свойственно, а характерно для дислокационных процессов (например, при двойниковании [6, 7]). Поэтому целесообразно в настоящее время дать новое название рассмотренным в данной работе дефектам с целью снятия отмеченных выше противоречий.

Полосы сдвига типа лучей формируются под действием сдвиговых напряжений, направленных от поверхности аморфной ленты (см. рис. 7 б). Это напоминает процесс формирования смешанной дислокации, у которой вектор Бюргерса параллелен дислокационной линии у поверхности и перпендикулярен ей в глубине материала. Как и в случае образования чешуйчатых навалов, у индентора лучи развиваются в полях сжимающих нормальных напряжений (см. рис. 7 б).

Количество полос сдвига, возникающих у индентора, равно числу активных источников формирования полос. На основании дислокацион-

ного подходу можна заключить, что активными будут те источники, для которых справедливо соотношение

$$\tau_{кр} = \frac{\alpha b G}{l}, \quad (14)$$

где $\tau_{кр}$ – критические сдвиговые напряжения начала генерации источником дислокаций; α – безразмерный коэффициент, обычно равный 0,5; b – модуль вектора Бюргерса; G – модуль сдвига; l – размер источника.

Следует отметить, что в (14) подразумевается, что речь идет о квазидислокациях, которые лишь введены для удобства списания процесса. По характеру развития полос (см. рис. 7) будем считать, что сдвиги в виде полуколец описываются краевыми дислокациями, а сдвиги типа лучей – смешанными. Также предположим, что величины b и l для двух рассматриваемых типов полос сдвига различны.

Учитывая приведенные на рис. 2 и 4 результаты, на основании (14) можно сделать вывод, что у полос сдвига типа полуколец величина b меньше, а l – больше, чем у полос сдвига типа лучей. Этим можно и объяснить более позднее вступление лучей в процесс пластической деформации.

Появление полос сдвига типа лучей у сплавов $Fe_{81.4}-Cr_{4.0}-Mo_{6.0}-Ni_{5.2}-C_{1.0}-Mn_{2.1}-Al_{0.3}$, $Fe_{71.7}-Ni_{6.0}-Co_{2.4}-Cr_{7.5}-Mo_{7.9}-B_{4.0}-Si_{0.5}$, $Fe_{86}-P_{9.8}-C_{1.0}-Si_{0.9}-Al_{1.7}-B_{0.6}$ при нагрузках, больших, чем 2 Н, в отличие от сплава $Fe_{46.3}-Cr_{40}-Mo_{7.2}-V_{0.5}-B_{4.0}-Si_{2.0}$, у которого они наблюдаются при 1 Н, на основании (14) может быть объяснено тем, что их модуль сдвига G несколько выше, чем у сплава системы $Fe_{46.3}-Cr_{40}-Mo_{7.2}-V_{0.5}-B_{4.0}-Si_{2.0}$.

Заключение

При локальном деформировании поверхности аморфных сплавов на основе железа пластическая деформация развивается путем формирования полос сдвига в виде чешуйчатых навалов и лучей.

Полосы сдвига в виде лучей возникают лишь при больших нагрузках. На основании дислокационного подхода возможно предположение, что у полос сдвига в виде полуколец величина вектора Бюргерса меньше, а размер их источника больше, чем у полос сдвига типа лучей.

В исследуемом интервале нагрузок зависимости N_{II} и L_{II} от P для сплавов $Fe_{81.4}-Cr_{4.0}-Mo_{6.0}-Ni_{5.2}-C_{1.0}-Mn_{2.1}-Al_{0.3}$, $Fe_{71.7}-Ni_{6.0}-Co_{2.4}-Cr_{7.5}-Mo_{7.9}-B_{4.0}-Si_{0.5}$, $Fe_{86}-P_{9.8}-C_{1.0}-Si_{0.9}-Al_{1.7}-B_{0.6}$ линейные. Для сплава $Fe_{46.3}-Cr_{40}-Mo_{7.2}-V_{0.5}-B_{4.0}-Si_{2.0}$ данные зависимости параболические. Однако зависимости N и L для данного сплава линейные.

Более позднее при повышении нагрузки на индентор формирование полос сдвига в виде лучей у сплавов $Fe_{81.4}-Cr_{4.0}-Mo_{6.0}-Ni_{5.2}-C_{1.0}-Mn_{2.1}-Al_{0.3}$, $Fe_{71.7}-Ni_{6.0}-Co_{2.4}-Cr_{7.5}-Mo_{7.9}-B_{4.0}-Si_{0.5}$, $Fe_{86}-P_{9.8}-C_{1.0}-Si_{0.9}-Al_{1.7}-B_{0.6}$, чем у сплава $Fe_{46.3}-Cr_{40}-Mo_{7.2}-V_{0.5}-B_{4.0}-Si_{2.0}$, может быть объяснено несколько более высоким значением модуля сдвига у первых, чем у последнего.

Автор благодарит М.Н. Верещанина за любезно предоставленные образцы и В.Г. Шеневича за обсуждение результатов и помощь в проведении рентгеноструктурного анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности пластической деформации при индентировании пирамидой Виккерса поверхности аморфного сплава Fe-Cr-Mo-V-B-Si / М.Н. Верещагин [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2002. – Т. 93. – № 5. – С. 101-104.
2. Исследование методом локального деформирования особенностей пластической деформации аморфного сплава Fe-Cr-Mo-V-B-Si / М.Н. Верещагин [и др.] // Кристаллография. – 2002. – Т. 47. – № 4. – С. 691-696.
3. **Глезер, А.М.** Структура и механические свойства аморфных сплавов / А.М. Глезер, Б.В. Молотилов. – М.: Металлургия, 1992. – 208 с.
4. **Джонсон, К.** Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
5. **Perez, J.** Homogeneous flow and anelastic/plastic deformation of metallic glasses / J. Perez // Acta. Met. – 1984. – Vol. 32. – № 12. – P. 2163-2173.
6. **Остриков, О.М.** Ветвление клиновидных двойников в монокристаллах висмута, деформированных сосредоточенной нагрузкой / О.М. Остриков // Физика металлов и металловедение. – 1999. – Т. 87. – № 1. – С. 94-96.
7. Некоторые особенности формы клиновидных двойников в монокристаллах висмута, деформированных сосредоточенной нагрузкой / О.М. Остриков // Физика металлов и металловедение. – 2000. – Т. 90. – № 1. – С. 91-95.

Поступила в редакцию 18.01.2010 г.

УДК 535.33:621.375

Е.В. ТИМОЩЕНКО (ГЛАЗУНОВА), В.А. ЮРЕВИЧ

ТРАНСФОРМАЦИЯ КОРОТКИХ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ТОНКИМ НЕЛИНЕЙНЫМ СЛОЕМ

Короткие световые импульсы, отражаемые нелинейным граничным слоем при наличии поверхностной резонансной и квазирезонансной поляризованности, должны приобретать четкую автомодуляционную субструктуру интенсивности. Природа высокочастотной самомодуляции отраженных сигналов – в сверхизлучательных свойствах отражения, проявляющихся в условиях бистабильности равновесных состояний колебательной системы “тонкая пленка активных атомов – резонансное излучение”.

Введение

Тонкопленочные системы на основе используемых в оптике и лазерной физике нелинейных материалов получили широкое распространение в устройствах передачи и обработки информации, что обусловлено их миниатюрностью и большими возможностями по управлению светом. Поляризованность таких систем при воздействии светового электрического

поля на образующие пленочные слои в значительной степени может характеризоваться резонансной нелинейностью [1; 2]. Даже при наличии единственной планарной пленки, среда которой обладает механизмом обратной связи, в условиях нелинейности взаимодействия можно ожидать возникновения нетривиальных режимов поведения, таких как бистабильность [3; 4], самопульсации [4; 5], а также формирование поперечных статических и движущихся пространственных структур [6; 7].

Реакцию пленки нелинейной среды на световое поле рассматривают в модели особо тонкого слоя резонансных атомов [3-10] (толщина слоя значительно меньше длины волны приложенного поля). Изучение этой модели включает, с одной стороны, задачу распространения нелинейных поверхностных волн, с другой – задачу об отражении ультракороткого импульса света от поверхности раздела линейных сред, содержащей подобный граничный слой [5; 8; 9]. В связи с необходимостью эффективного управления лазерным излучением, а также созданием элементной базы оптоэлектроники возникает чисто практический интерес к изучению отклика пленочных структур на световые импульсы. Тогда с учетом насыщения поглощения такими импульсами механизмы нелинейности взаимодействия оказываются особо эффективными, обуславливая этим проявление эффектов фазового смещения.

В литературе фазовые эффекты в основном рассмотрены как следствие взаимного влияния дипольных атомов. Эффект диполь-дипольного взаимодействия анализировался в рамках учета локального поля Лоренца [8; 9]. Известно, что фазовая модуляция излучения может быть обусловлена влиянием квазирезонансных компонент поляризуемости на диэлектрическую проницаемость [11]. В этой ситуации оказывается важным также учет штарковского смещения резонансных уровней. В настоящей работе анализируется влияние обоих этих факторов нелинейности на динамику отражения тонкой активной пленкой короткого светового импульса. Задача об отражении импульса рассматривается в пределе ультракоротких длительностей, намного меньших характерных времен необратимой релаксации резонансной поляризованности, что соответствует когерентному режиму взаимодействия поля импульса со средой пленки.

Основные уравнения

Полагаем, что на слой резонансно поляризуемых атомов, толщина которого l намного меньше длины волны света $l \ll \lambda = 2\pi c / \omega$, нормально падает плоская световая волна частоты ω с амплитудой E_i , относительно медленно меняющейся на промежутках времени, сравнимых с периодом светового колебания. Взаимодействие поля лазерного излучения с веществом границы, разделяющей оптические среды диэлектрической проницаемости ϵ_1 и ϵ_2 , описывается модифицированной системой уравнений Максвелла-Блоха [10] для квазистационарных нормированных комплексных амплитуд поля проходящей и отраженной волн (E и E_r) и вероятностных переменных резонансного отклика среды (от-

несенных к одному атому – поляризованности p и разности заселенности уровней основного перехода n):

$$E(t) = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} E_i(t) - \frac{\omega N}{(\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2})c} \left[\frac{\mu}{\varepsilon_0} p - i2\pi\Delta\alpha(n - n_0)E(t) \right], \quad E_r = E - E_i, \quad (1)$$

$$\dot{p} + i \left(\omega - \omega_0 + \frac{\Delta\alpha}{\hbar} \pi \varepsilon_0 |E|^2 \right) p = \frac{\mu}{\hbar} n E, \quad \dot{n} = -\frac{\mu}{2\hbar} (p^* E + p E^*).$$

Здесь μ – средний дипольный момент активных атомов, N – их поверхностная плотность, $\Delta\alpha$ – дефект поляризуемости (разность поляризуемостей в основном и возбужденном состоянии атома), ω_0 – резонансная частота перехода, n_0 – начальное значение разности заселенности. Уравнения связи полей в (1) записаны на основе используемых при решении уравнений Максвелла граничных условий для полей E , E_r и E_i на границе раздела сред. Учет переходных процессов в среде граничного слоя приводит к тому, что наряду с френелевским отражением коротких световых импульсов в отражении (преломлении) присутствует дополнительная компонента, обусловленная нелинейной поверхностной поляризацией. Динамика поля $E(t)$ в слое непосредственно определена двумя материальными компонентами: резонансной поляризованностью p и квазирезонансной составляющей поляризации $p_1 = 2\pi\varepsilon_0\Delta\alpha N(n - n_0)E$. Члены, пропорциональные поляризованности p и p_1 , означают учет компоненты нелинейного отклика граничного слоя, связанной со сверхизлучением ансамбля активных атомов, включенных в его среду [12]. С влиянием переходов, соседних с резонансным, связана возможность квадратичного штарковского эффекта: штарковское смещение резонансных уровней в представлении обобщенной двухуровневой схемы [11] описывается фазовым сдвигом резонансной поляризации, пропорциональным $\Delta\alpha|E|^2/\hbar$.

В расчетах на основе (1) удобно использовать нормированные переменные и коэффициенты $e(t) = \frac{\varepsilon_0 c}{\mu \omega N} \sqrt{\varepsilon_1} E(t)$, $\beta = \frac{2\pi \omega N}{c \sqrt{\varepsilon_1}} \Delta\alpha$. Также удобно ввести параметр $\tau_R = \frac{\varepsilon_0 c}{\mu^2 \omega N} \hbar \sqrt{\varepsilon_1}$, который обычно именуют временем сверхизлучения [3; 8; 12]. В дальнейшем по этому параметру пронормируем время t и отстройку несущей частоты ω от частоты резонанса: $\tau = t/\tau_R$, $\Delta = (\omega - \omega_0)\tau_R$. При соответствующей нормировке полей внешнего и отраженного сигнала систему (1) тогда представим в виде

$$e(\tau) = \frac{2}{1 + \eta} e_i(\tau) - \frac{1}{1 + \eta} [p - i\beta(n - n_0)e(\tau)], \quad e_r = e - e_i, \quad (2)$$

$$\frac{dp}{d\tau} + i \left(\Delta + \frac{\beta}{2} |e|^2 \right) p = ne, \quad \frac{dn}{d\tau} = -\frac{1}{2} (p^* e + p e^*),$$

где η – относительный показатель преломления сред, разделенных активным слоем.

Бистабильность равновесного состояния расчетной модели

Равновесные значения переменных p и n могут быть установлены при расчете соотношения стационарных напряженностей (или интенсивностей) падающего поля e_0 ($e_i(t) = e_0$) и поля e_s , установившегося внутри слоя. Достижение квазиравновесного поля e_s в условиях когерентного взаимодействия возможно, например, при нормальном падении на слой импульса прямоугольной формы с амплитудой e_0 и длительностью τ_i , значительно превышающей время сверхизлучения τ_R . Связь интенсивностей этих полей дает возможность судить об особенностях зависимости поглощения в слое от мощности резонансного поля. Из материальных уравнений системы (2) следует, что в среде слоя в ходе действия такого импульса достигаются такие равновесные значения поляризованности и разности заселенности:

$$p_s = \pm \frac{i e_s}{\sqrt{(\Delta + \beta |e_s|^2/2)^2 + |e_s|^2}}, \quad n_s = \mp \frac{\Delta + \beta |e_s|^2/2}{\sqrt{(\Delta + \beta |e_s|^2/2)^2 + |e_s|^2}},$$

удовлетворяющие закону сохранения вектора Блоха [11; 12]: $|p|^2 + n^2 = 1$.

Следуя выражениям электродинамических условий для напряженности полей в (2), можно установить, что для $n_0 = -1$ равновесное значение нормированной интенсивности $X_s = |e_s|^2$ поля, прошедшего сквозь тонкую пленку, связано с интенсивностью зондирующего поля $Y_0 = |e_0|^2$ таким соотношением:

$$\frac{4}{(1+\eta)^2} Y_0 = X_s \left\{ 1 + \frac{1}{(1+\eta)^2} \left[\frac{1 + \beta(\Delta + \beta X_s/2)}{\sqrt{(\Delta + \beta X_s/2)^2 + X_s}} - \beta \right]^2 \right\}. \quad (3)$$

На основе решений уравнения (3) относительно X_s может быть выражена нелинейная пропускательная способность тонкого слоя резонансных атомов. В расчетах нелинейной характеристики $X_s(Y_0)$ оказывается удобным использовать значение X_s в качестве параметра – неотрицательного и линейно нарастающего. На рисунке 1 приведены результаты расчета тех участков типичных зависимостей $X_s(Y_0)$, где проявляются особые свойства пропускания.

Вывод о том, что в условиях когерентного взаимодействия импульс достаточно малой интенсивности не способен инвертировать ансамбль 2-уровневых атомов, образующих тонкий слой, и должен им полностью отражаться, в литературе известен (см., например [1]). Эта закономерность явно выражена на рисунке 1, а, например, зависимостью $X_s(Y_0)$ для $\beta = 0$ (линия 1) – прямая линия, устанавливающая в этом случае линейную связь интенсивностей падающего и прошедшего пленку полей, берет начало от некоторой критической границы значений входной интенсивности. Эта критическая граница интенсивности внешнего сигнала Y_0 зависит от показателя η . Заметно далее, что существование квазирезонансной поляризуемости ($\beta \neq 0$) заметно меняет ситуацию. При определенных β существование обратной связи

между процессами, определяющими в (1) соответственно фазовое смещение поля излучения и сдвиг резонансных уровней, влечет за собой в некоторой области параметров неоднозначность зависимости X_s от Y_0 (кривые 2-4 рис.1, а). Для больших величин Y_0 (нелинейное смещение частоты перехода при этом полностью компенсирует автомодуляционное частотное смещение светового поля в среде в ходе перераспределения частиц по уровням) связь X_s с Y_0 вновь становится однозначной. Реально такая особенность этой характеристики взаимодействия поля с веществом нелинейной пленки должна проявиться в том, что при увеличении интенсивности импульсов пропускание слоя вблизи критической границы может измениться скачком. Снижение интенсивности от достигнутого уровня приводит к тому, что возвращение к минимальному уровню пропускания произойдет также скачком, но уже при меньшей величине интенсивности, которое ниже значения, соответствующего критической границе. В этом случае говорят о гистерезисном характере зависимости. Бистабильность нелинейной пропускательной способности должна наблюдаться и в условиях определенной отстройки несущей частоты падающего сигнала от резонанса (рис.1, б). Тогда бистабильный ход зависимости выражен более характерным для гистерезисного свойства связи физических величин S-образным изгибом (кривые 3, 4 на рис.1,б).

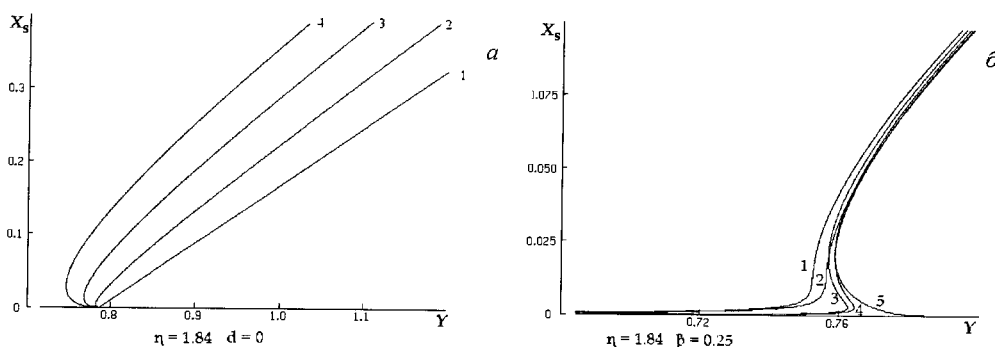


Рис. 1. Зависимость равновесной интенсивности проходящей волны от интенсивности падающей волны для различных значений β (а) и Δ (б): $\beta = 0$ (1), 0.1 (2), 0.2 (3), 0.3 (4), $\Delta = 0$ (а); $\Delta = 0.010$ (1), -0.010 (2), 0.005 (3), -0.005 (4), 0 (5), $\beta = 0.25$ (б), $\eta = 1.84$

Таким образом, при определенном уровне различия поляризуемостей $\Delta\alpha$ нелинейная зависимость пропускания тонкого слоя в когерентном режиме способна приобретать гистерезисный характер. Гистерезис в этом случае возможен без дополнительных отражающих поверхностей, только за счет наличия обратной связи между различными проявлениями нелинейности отклика среды пленки. Размеры области гистерезиса, определяемой по различию X_s и Y_0 в точках поворота нелинейной характеристики, зависят от соотношения β и η . Для динамики излуче-

ния бистабильность представляет довольно значимую особенность нелинейного отклика граничного слоя. Известно, например, из [1; 3-6], что гистерезисом во взаимосвязи равновесных состояний колебательной системы могут быть обусловлены ее самоиндуцированная неустойчивость и самопульсации переменных.

Автомодуляционные изменения отраженных и прошедших импульсов

В задаче расчета поведения отклика резонансных пленок в сильно нестационарных условиях импульсного воздействия напряженность поля $e_i(t)$ зондирующего светового импульса субпикосекундной длительности задавалась в виде гиперболического секанса. Амплитуды импульсов соответствовали случаю рассматриваемых в теории когерентного взаимодействия так называемых π -импульсов. Величина полярного угла вектора Блоха, рассчитываемая как $\theta_0 = \frac{\mu}{\hbar} \int_0^\infty E_i(t) dt$ и выражающая, как говорят, нормированную "площадь импульса поля", для входных импульсов была сравнима или превышала значение π . Примеры расчетного моделирования на основе системы (2), наиболее характерные для большого числа вариантов трансформации импульсов, приведены ниже на рисунках.

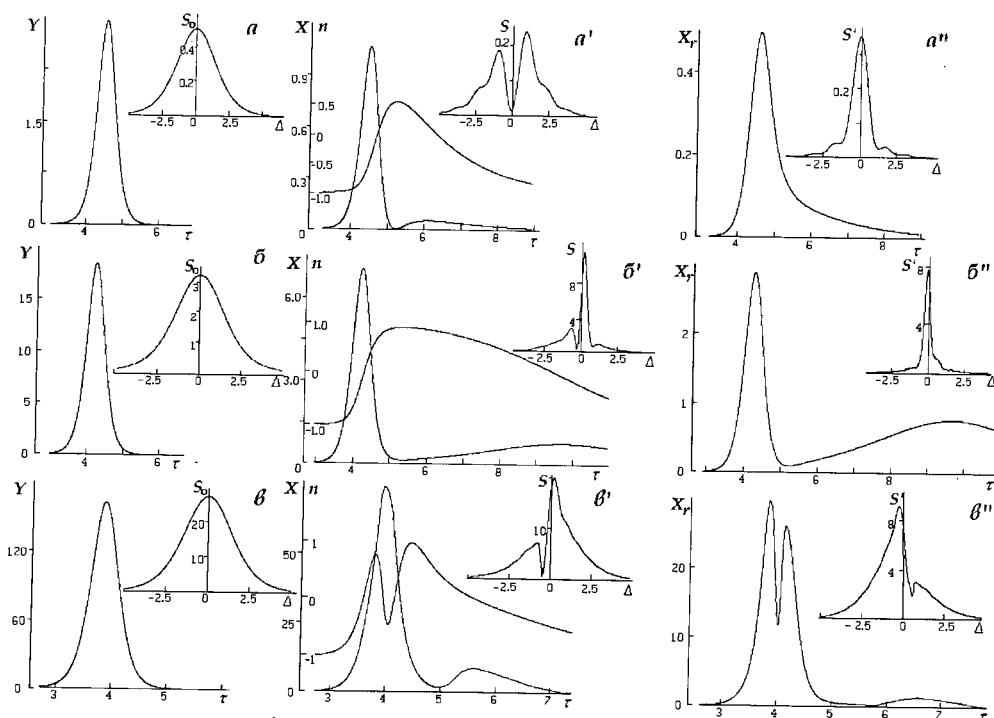


Рис. 2. Интенсивность и спектральная развертка интенсивности входного (a - θ), прошедшего (a' - θ') и отраженного (a'' - θ'') импульсов: $\theta_0/\pi = 0.4$ (a - a''), 1 (b - b''), 3 (θ - θ''), $\beta = 0.25$, $\Delta = 0$, $\eta = 1.84$

Рисунок 2 демонстрирует изменение формы и спектра прошедших и отраженных импульсов в зависимости от их пиковой мощности (на рис. 2, *a, б, в* приведены форма $Y(\tau) = |e_i(\tau)|^2$ и спектр $S_0(\Delta)$ входного импульса). Частотное распределение интенсивности импульса $S(\Delta) = |e(\Delta)|^2$, как и в [8; 12; 13], рассчитывалось на основе известного соотношения для фурье-спектра $e(\Delta) = (1/2\pi)^{1/2} \int e(\tau) \exp(-\Delta\tau) d\tau$.

Трансформация действующих на пленку импульсов носит в основном сверхизлучательную природу, т.е. обусловлена нутационными колебаниями разности заселенности и поляризованности. Импульс может инвертировать разность заселенности уровней основного перехода (см. кривые зависимости $n(\tau)$ на рис.2, *a', б', в'*), поэтому на заднем фронте прошедших импульсов появляется незначительный всплеск интенсивности. Сверхизлучательный характер изменений проявляется и в расщеплении фурье-спектра прошедших импульсов (рис.2, *a', б', в'*). В отличие от фурье-спектров, анализируемых в [12], компоненты спектральных разверток асимметричны, что характерно для сред с квазирезонансной поляризованностью [13]. Фурье-спектры отраженных импульсов представляют собой обращение спектров прошедших импульсов (рис. 2, *a'', б'', в''*). Отраженным импульсам также присуща асимметрия фронтов или возникновение всплесков в зависимости интенсивности, кроме того, появилось некоторое увеличение длительности импульсов. Следствием последнего является сужение спектров. Обратим внимание на то, что сверхизлучательные всплески на заднем фронте прошедших импульсов должны наблюдаться и при $\theta_0 < \pi$, что также является следствием фазовой модуляции излучения в условиях поляризующего влияния квазирезонансных переходов на диэлектрическую проницаемость [13].

Отметим далее, что с ростом пиковой интенсивности входного импульса (соответственно, с увеличением полярного угла вектора Блоха θ_0) должна возникать несколько иного рода деформация отраженного сигнала (рис.2, *в'*). Отраженный импульс приобретает, в сущности, высокочастотную модуляцию. Ее динамику и связь с нутационными колебаниями разности заселенности более детально демонстрируют результаты моделирования на рисунке 3.

Для удобства сравнения трансформированный импульс в масштабе собственной интенсивности изображен на фоне нормированного по пиковой мощности входного сигнала (кривые 1). Уже отмечено, что фазовые эффекты, вызванные квазирезонансной поляризованностью, способны увеличить частоту нутации (в [13] эта особенность предсказывалась для условий когерентного усиления импульсов в протяженных средах). Нутационная частота возрастает и при воздействии резонансного поля сверхкоротких импульсов на тонкий слой с активной абсорбцией. Зависимости на рисунках 3,а и 3,г отвечают традиционно анализируемому случаю только резонансной поляризации ($\beta=0$), на рисунках 3,б и 3,д импульсы трансформированы еще и в условиях квазирезонансной поляриза-

ции. Модуляция интенсивности импульса может возникать только в случае наличия квазирезонансных переходов, для прошедшего пленку излучения она гораздо менее контрастна. По результатам на рисунках 3,б, 3,в, 3,д и 3,е можно судить о том, что модуляционные выбросы на профиле импульсов (кривые 2) повторяют динамику нутационных колебаний разности заселенности (кривые 3). Следовательно, модуляция также имеет сверхизлучательную природу (в случае сверхизлучения осцилляции интенсивности пропорциональны квадрату заселенности [11]). Само возникновение автомодуляционной составляющей интенсивности, однако, связано с реализующейся в случае квазирезонансной поляризованности бистабильностью равновесных состояний колебательной системы “тонкая пленка активных атомов – резонансное излучение”.

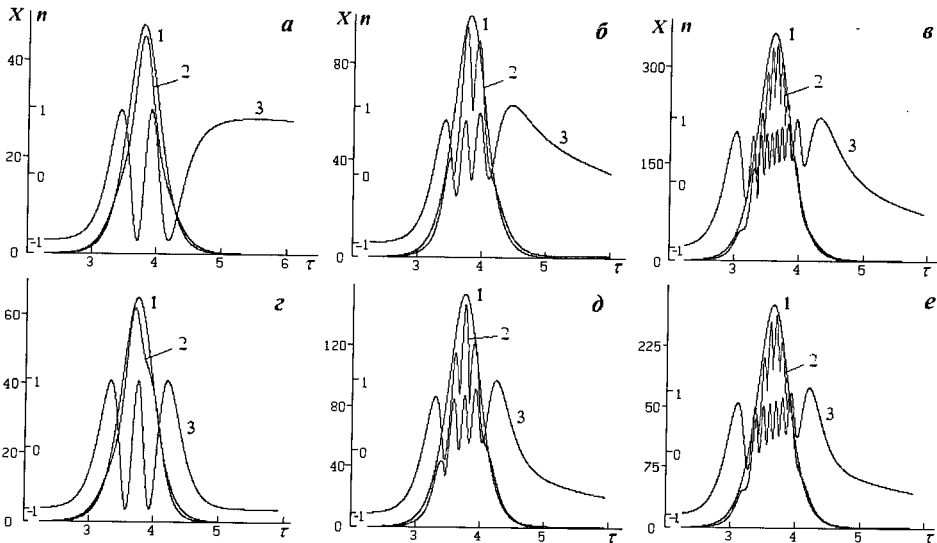


Рис. 3. Динамика интенсивности входного (кривые 1) и отраженного (2) сигнала, разности заселенности в граничном слое (3): $\theta_0/\pi = 5$ (а,б), 9 (в), 6 (г,д), 8 (е), $\beta = 0$ (а,г), 0.25 (б,в,д,е), $\Delta = 0$

Масштаб анализируемых закономерностей в трансформации резонансных сигналов примерно соответствовал параметрам сред люминесцентных кристаллов [1]. При выборе этих параметров, в частности, ориентировались на данные, использованные в статье [14]. Время сверхизлучения τ_R примерно было равным 10^{-12} с, поэтому на рисунках временная шкала для интенсивности импульсов и разности заселенности может представляться как пикосекундная.

Заключение

В пределе ультракоротких длительностей, значительно меньших характерных времен необратимой релаксации поляризации, при анализе отражения импульсного сигнала граничным слоем с нелинейной поверхност-

ной поляризованностью необходим последовательный учет фазовой авто-модуляции. Бистабильность и обусловленная ею самоиндуцированная неустойчивость колебательной модели “тонкая пленка активных атомов – резонансное излучение” способны обусловить высокочастотную модуляцию отраженного сигнала. Особенности модуляции связаны с закономерностями сверхизлучения в условиях влияния квазирезонансной поляризованности. Результаты исследования могут быть полезны при разработке методов диагностики нелинейных свойств субмикронных планарных слоев.

Е.В.Тимощенко (Глазунова) признательна Белорусскому РФФИ за поддержку работы (Проект № Ф06М – 231).

ЛИТЕРАТУРА

1. Нелинейность показателя преломления лазерных твердотельных диэлектрических сред / А.Н.Азаренков [и др.] // Квант. электрон. – 1993. – Т. 20. – № 3. – С. 737-757.
2. **Garmire, E.** Resonant optical nonlinearities in semiconductors / E. Garmire // IEEE Journ. Sel. Top. Quant. Electron. – 2000. – Vol. 6. – No 6. – P. 1094-1110.
3. **Башаров, А.М.** Тонкая пленка двухуровневых атомов – простая модель оптической бистабильности и самопульсаций / А.М. Башаров // ЖЭТФ. – 1988. – Т. 94. – Вып. 9. – С. 12-18.
4. **Oraevsky, A.N.** A theory of resonant bistability in a thin layer optical element / A.N. Oraevsky, D.J. Jones, D.K. Bandy // Opt. Commun. – 1994. – Vol. 111. – P. 163-172.
5. **Захаров, С.М.** Нелинейная резонансная оптика тонких пленок / С.М. Захаров // ЖЭТФ. – 2002. – Т. 118. – С. 2234-2247.
6. Triadic hopf-static structures in two-dimensional optical pattern formation / A.A. Afanas'ev [et al.] // Phys. Rev. E. – 1996. – Vol. 54. – P. R4548-R4551.
7. **Logvin, Yu.A.** Resonant hopf triads in a delayed optical pattern forming system / Yu.A. Logvin, N.A. Loiko // Phys. Rev. E. – 1997. – Vol. 56. – P. 3803-3808.
8. **Benedict, M.** Reflection and transmission of ultrashort light pulses through a thin resonant medium: Local-field effects / M. Benedict, V.A. Malyshev, E.D. Trifonov // Phys. Rev. A. – 1991. – Vol. 43. – No.7. – P. 3845-3853.
9. **Захаров, С.М.** Взаимодействие УКИ света с тонкопленочными резонаторными структурами / С.М. Захаров // ЖЭТФ. – 1995. – Т. 108. – С. 829-841.
10. **Юревич, В.А.** Бистабильность пропускания тонкого слоя вещества с квазирезонансными компонентами поляризуемости / В.А. Юревич // Журн. прикл. спектр. – 1999. – Т. 66. – № 5. – С. 661-665.
11. **Апанасевич, П.А.** Основы теории взаимодействия света с веществом. – Минск, 1977. – 496 с.
12. **Benedict, M.** Coherent reflection as superradiation from the boundary of a resonant medium / M. Benedict, E.D. Trifonov // Phys. Rev. A. – 1988. – Vol. 38. – No 6. – P. 2854-2862.
13. **Юревич, В.А.** Особенности когерентного усиления коротких оптических импульсов в средах с нерезонансной поляризуемостью / В.А. Юревич // Квант. электрон. – 1990. – Т. 17. – № 7. – С. 951-953.
14. Динамика сверхизлучающих сред в резонаторе / А.М. Башаров [и др.] // Квант. электрон. – 2009. – Т. 39. – № 3. – С. 251-255.

УДК 535.33

Е.О. КОТЯШЕВ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОГЕРЕНТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА С АКТИВНОЙ СРЕДОЙ

Рассмотрено применение метода конечных разностей во временной области (FDTD) для моделирования сверхбыстрой динамики излучения в двухуровневой активной среде. В основе метода лежат уравнения Максвелла и уравнение Блоха для диагонального элемента матрицы плотности. Проведено моделирование процесса образования π -импульсов в инвертированной усиливающей среде, которое иллюстрирует перспективность данного подхода для применения в физике лазеров ультракоротких импульсов.

Введение

Исследование динамики импульсов в активных лазерных средах чаще всего выполнялось с помощью метода медленных огибающих, который предполагает возможность представления поля излучения в виде произведения быстро меняющейся и медленной компонент. В случае сверхбыстрого когерентного взаимодействия излучения с активной средой, которое имеет место при распространении ультракоротких лазерных импульсов длительностью в несколько фемтосекунд, этот метод становится непригодным.

В последнее время приобрела актуальность проблема численного моделирования взаимодействия электромагнитного излучения с различного рода лазерными активными средами. В связи с увеличением мощности компьютеров и их повсеместной доступностью широкое распространение получил численный метод решения уравнений Максвелла – метод конечных разностей во временной области (finite difference time domain, FDTD) [1]. Спектр его применения охватывает широкий круг проблем, начиная от расчета структуры рассеянного микроволнового излучения радаров и кончая изучением распределения электромагнитного поля в микроструктурных волокнах и резонаторах.

Этот метод позволяет получить значения векторов электрического и магнитного поля в дискретных точках изучаемого объема в произвольный момент времени. Он базируется на пространственно-временной дискретизации уравнений Максвелла по специфической схеме, так называемой схеме Йи. В данной работе рассмотрена адаптация метода FDTD для совместного решения уравнений Максвелла и уравнений Блоха в действительной форме для среды из двухуровневых атомов. Решение уравнений Максвелла с уравнениями Блоха в комплексной форме рассмотрено в работе [2].

Преимущества использования данного метода состоят в возможности исследовать пространственно-временную динамику в отсутствии приближения медленно меняющихся амплитуд в пространстве действительных переменных и позволяют моделировать распространение ультракоротких лазерных импульсов, длительность которых составляет всего несколько периодов колебаний поля. Создание теории лазеров ультракоротких импульсов, основанной на компьютерных моделях, учитывающих когерентное взаимодействие генерируемого излучения со средой, — одно из актуальных направлений лазерной физики.

FDTD-моделирование распространения плоской волны TE-поляризации

Уравнения Максвелла в системе единиц Хевисайда-Лоренца имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{D} &= \rho & \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} &= \operatorname{rot} \vec{H} \\ \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= -\operatorname{rot} \vec{E} & \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Поля связаны со свойствами среды через материальные уравнения

$$\vec{D} = f(\vec{E}, \vec{P}) \quad \vec{B} = f(\vec{H}, \vec{M}), \quad (2)$$

где векторы \vec{P} и \vec{M} обозначают макроскопическую поляризацию и намагниченность среды соответственно.

Для плоской волны, распространяющейся вдоль оси Ox и имеющей компоненты D_z и H_y , при отсутствии свободных зарядов и токов проводимости роторные уравнения из (1) принимают следующий вид:

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = \frac{1}{c} \frac{\partial D_z}{\partial t}, \quad \frac{\partial E_z}{\partial x} = \frac{1}{c} \frac{\partial B_y}{\partial t}. \quad (3)$$

Частные производные заменим разностными соотношениями вида

$$\left. \frac{\partial F(s)}{\partial s} \right|_{s=p} \approx \frac{F(p + \delta s/2) - F(p - \delta s/2)}{\delta s}, \quad (4)$$

где s — время или одна из декартовых координат. Для вычисления значения функции в точке p по известным значениям функции в точках $p + \delta s/2$ и $p - \delta s/2$ используется усреднение

$$F(p) = \frac{F(p + \delta s/2) + F(p - \delta s/2)}{2}. \quad (5)$$

Введем равномерную сетку с шагом δt по времени и δx по координате. Численная схема Йи предполагает вычисление электрического поля в узлах сетки с целым индексом, координатная сетка для магнитного поля сдвинута на полшага относительно электрического поля. При этом временная сетка также сдвинута на половину временного шага (рис. 1).

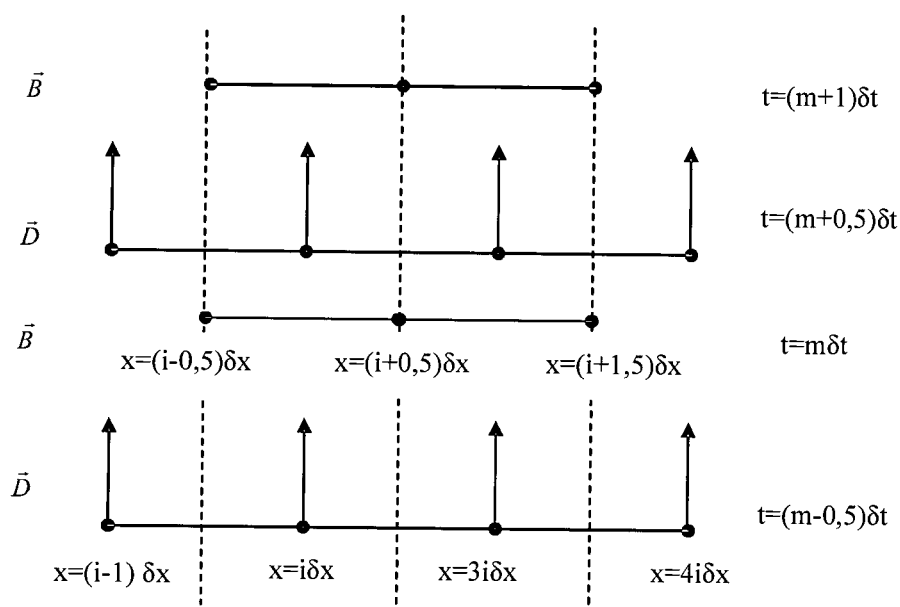


Рис. 1. Схема пространственно-временной дискретной сетки для вычисления векторов магнитной и электрической индукции

Учитывая численные выражения для производных и правила усреднения, получаем следующие дискретные соотношения:

$$B_y|_{i+1/2}^{m+1} = B_y|_{i+1/2}^m + \frac{c\delta t}{\delta x} \left(E_z|_{i+1}^{m+1/2} - E_z|_i^{m+1/2} \right), \quad (6a)$$

$$D_z|_{i+1/2}^{m+1/2} = D_z|_{i+1/2}^{m-1/2} + \frac{c\delta t}{\delta x} \left(H_y|_{i+1/2}^m - H_y|_{i-1/2}^m \right). \quad (6б)$$

Порядок вычисления наглядно иллюстрирован на рис. 1. Расчет начинается с некоторого распределения индукции электрического поля в момент времени $m-0,5$, и вычисляются значения индукции магнитного поля во всех точках сетки в момент времени m согласно соотношению (6a). Затем вычисляются значения индукции электрического поля в момент времени $m+0,5$ согласно соотношению (6б). Описанный процесс вычислений повторяется для каждого момента времени.

Уравнения Блоха для двухуровневой среды и их связь с осцилляторным уравнением Лоренца для макроскопической поляризации

Рассмотрим квантовую систему, которая может находиться только в двух состояниях с энергиями E_a и E_b , такими, что $E_b - E_a = \hbar\Omega$. Временная динамика взаимодействия такой системы с электрическим полем описывается уравнениями Блоха для матрицы плотности, которые в приближении вращающейся волны имеют вид

$$\dot{\rho}_{ba} = -i\Omega\rho_{ba} + \frac{i}{\hbar}\vec{d}_{ab} \cdot \vec{E}(t)N, \quad (7a)$$

$$\dot{N} = -2\frac{i}{\hbar}\vec{d}_{ab} \cdot \vec{E}(t)(\rho_{ba}^* - \rho_{ba}), \quad (76)$$

причем $N = 2\rho_{aa} - 1 = 1 - 2\rho_{bb}$, $\rho_{aa} + \rho_{bb} = 1$. Здесь ρ_{ij} – компоненты матрицы плотности двухуровневой системы, * обозначает комплексное сопряжение, N – плотность инверсии, изменяется в пределах от -1 , что соответствует полностью инвертированной системе, до 1 – полностью неинвертированное состояние. Вектор \vec{d}_{ab} – дипольный момент перехода между энергетическими уровнями.

В классической оптике известно дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее временную динамику поляризации диэлектрической среды под воздействием внешнего электрического поля, так называемое уравнение Лоренца

$$\frac{d^2 P(t)}{dt^2} + 2\gamma \frac{dP}{dt} + \omega_0^2 P(t) = F(t). \quad (8)$$

В этом уравнении все члены, резонансная частота ω_0 , коэффициент затухания γ , поляризация P и возмущающая сила осциллятора F являются действительными числами и могут быть измерены экспериментально. Из математического анализа известно, что дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами эквивалентно системе из двух дифференциальных уравнений первого порядка. Комплексное дифференциальное уравнение для микроскопической поляризации можно преобразовать к виду, аналогичному уравнению Лоренца [3]. Преобразуем (8) к системе двух дифференциальных уравнений

$$\dot{P} = Q, \quad \dot{Q} = -\omega_0^2 P - 2\gamma Q + F \quad (9)$$

или в матричной нотации

$$\dot{x} = A \cdot x + b, \quad \text{где } x = \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2\gamma \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ F \end{bmatrix}.$$

Собственные значения и собственные векторы матрицы A равны

$$\lambda_{1,2} = -\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}, \quad v_{1,2} = \begin{bmatrix} -\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \\ \omega_0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad \text{Предполагая, что } \gamma < \omega_0, \text{ что}$$

справедливо для большинства реальных физических систем, можно ввести действительный параметр $\Omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$. Для расщепления этой линейной системы необходимо произвести операцию диагонализации матрицы A . $U^{-1}\dot{x} = U^{-1} \cdot A \cdot U \cdot U^{-1} \cdot x + U^{-1} \cdot b$ или

$$\dot{y} = D \cdot y + e, \quad (10)$$

где $y = U^{-1}x$, $D = U^{-1} \cdot A \cdot U$, при этом учтен тот факт, что U не зависит от времени. Матрица U состоит из собственных векторов матрицы A

$$U = \eta \begin{bmatrix} \frac{-\gamma + i\Omega}{\omega_0^2} & \frac{-\gamma - i\Omega}{\omega_0^2} \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad U^{-1} = \frac{1}{2\Omega\eta} \begin{bmatrix} -i\omega_0^2 & -i\gamma + \Omega \\ i\omega_0^2 & i\gamma + \Omega \end{bmatrix},$$

здесь η – произвольный нормировочный множитель, значение которого будет определено далее.

Таким образом,

$$y = -\frac{i}{2\eta\Omega} \left\{ \begin{bmatrix} \omega_0^2 \\ -\omega_0^2 \end{bmatrix} P + \begin{bmatrix} \gamma + i\Omega \\ -\gamma + i\Omega \end{bmatrix} Q \right\}, \quad D = \begin{bmatrix} -\gamma - i\Omega & 0 \\ 0 & -\gamma + i\Omega \end{bmatrix}, \quad e = \frac{1}{2\eta} \begin{bmatrix} 1 - \frac{i\gamma}{\Omega} \\ 1 + \frac{i\gamma}{\Omega} \end{bmatrix} F. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (10), получим

$$-\frac{i}{2\eta} \{ \omega_0^2 \dot{P} + (\gamma + i\Omega) \ddot{P} \} = \frac{i}{2\eta\Omega} (\gamma + i\Omega) \{ \omega_0^2 P + (\gamma + i\Omega) \dot{P} \} + \frac{fF}{2\eta} \left(1 - i \frac{\gamma}{\Omega} \right). \quad (12)$$

Сравнивая (12) с (76), получаем связь величины поляризации и диагонального элемента матрицы плотности двухуровневой системы

$$\rho_{ba} = \left(1 + \frac{\gamma^2}{\Omega^2} \right)^{-1} P + i \left\{ \left(\frac{\Omega}{\gamma} + \frac{\gamma}{\Omega} \right)^{-1} P + \frac{\Omega}{\omega_0^2} \dot{P} \right\}. \quad (13)$$

Для возмущающей силы F , сравнивая (12) и (9), имеем $F = \frac{\omega_0^2}{\hbar\Omega} \vec{d}_{ab} \cdot \vec{E}N$,

тогда (8) принимает окончательный вид

$$\ddot{P} + 2\gamma\dot{P} + \omega_0^2 P = \frac{\omega_0^2}{\hbar\Omega} \vec{d}_{ab} \cdot \vec{E}N. \quad (14)$$

Очевидно, что в случае $\gamma \ll \omega_0$ действительная часть (13) совпадает с поляризацией в уравнении Лоренца (9). Из (76) и (13) имеем соотношение для плотности инверсии $\dot{N} = -4 \frac{\Omega}{\hbar\omega_0^2} \dot{P} \vec{d}_{ab} \cdot \vec{E}$. Для учета релаксации инверсии к равновесному значению N_0 вводится феноменологический член γ_{nr} [4], с учетом которого получаем

$$\dot{N} = -4 \frac{\Omega}{\hbar\omega_0^2} \dot{P} \vec{d}_{ab} \cdot \vec{E} - \gamma_{nr} (N_0 - N). \quad (15)$$

Связь уравнений Максвелла с соотношениями (9-10) для двухуровневой среды осуществляется через материальное уравнение для вектора электрического смещения

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} + 2n_a \vec{d}_{ab} P. \quad (16)$$

Таким образом, дополняя систему уравнений Максвелла (1) уравнениями (14-16), мы получаем соотношения, описывающие динамику электромагнитного излучения в двухуровневой активной среде.

Численное моделирование распространения ультракороткого импульса в среде из двухуровневых атомов

Для численных расчетов классические численные соотношения (6) дополнялись дискретной формой уравнений для двухуровневой среды. Используя правила замены производных и усреднения из соотношений (14-16), получим

$$P_{i,j,k}^{m+1/2} = \frac{2 - \omega_0^2 \delta t^2}{1 + \gamma \delta t} P_{i,j,k}^{m-1/2} - \frac{1 - \gamma \delta t}{1 + \lambda \delta t} P_{i,k,k}^{m-3/2} + \frac{\omega_0^2 \delta t^2}{\hbar \Omega} (1 + \gamma \delta t)^{-1} (d_{ab} E)_{i,j,k}^{m-1/2} N_{i,j,k}^{m-1/2}, \quad (17)$$

$$N_{i,j,k}^{m+1/2} = \frac{2 - \gamma_{nr} \delta t}{2 + \gamma_{nr}} N_{i,j,k}^{m-1/2} + \frac{2 \delta t N_0}{2 + \gamma_{nr} \delta t} (-2\Lambda + \gamma_{nr} N_0) - \frac{4\Omega}{\hbar \omega_0} (2 + \gamma_{nr} \delta t)^{-1} \left(d_{ab} \cdot \left(|E|^{m+1/2} + |E|^{m-1/2} \right) \right)_{i,j,k}^m \left(P_i^{m+1/2} - P_i^{m-1/2} \right). \quad (18)$$

При расчетах использовались следующие параметры: $\delta t = 3 \cdot 10^{-17}$ с, $\delta x = 2 \cdot 10^{-8}$ м, $\omega_0 = 3 \cdot 10^{15}$ с⁻¹, $\Lambda = 0$, $d_{ab} = -2 \cdot 10^{-29}$ А·с·м, $\gamma = 1014$ с⁻¹, $\gamma_{nr} = 5 \cdot 10^7$ с⁻¹, $N_0 = 0$, $n_a = 10^{23} \sim 10^{25}$ м⁻³, амплитуда напряженности поля импульса $E_0 = 10^5 \sim 10^8$ В·м⁻¹, начальная инверсия равна -1, что соответствует полностью инвертированной среде. Изучался процесс распространения одиночного ультракороткого импульса гауссовой формы огибающей. Результаты расчета напряженности электрического поля в различные моменты времени показаны на рисунке 2. Видно, что процессы существенного искажения формы импульса происходят на временных интервалах, соизмеримых с длительностью импульса.

Моделировался также и процесс распада одиночного импульса на так называемые π -импульсы, каждый из которых полностью сбрасывает инверсию активной среды (рис. 3). На вставке изображено распределение напряженности электрического поля импульса на входе в среду. По горизонтальной оси отложен номер шага по координате. В процессе когерентного усиления исходный импульс разбивается на последовательность π -импульсов. В результате релаксационного процесса амплитуда

следующих друг за другом импульсов уменьшается, а их длительность увеличивается. Динамика π -импульсов хорошо исследована теоретически [4, 5] и согласуется с результатами вычислений, показанных на рисунках 2 и 3.

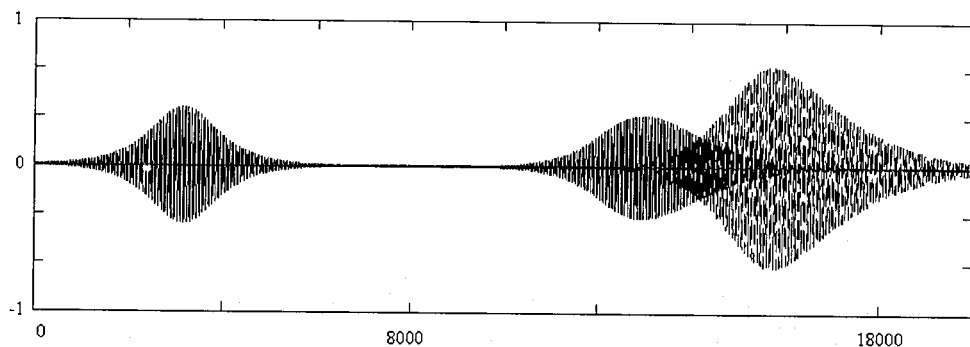


Рис. 2. Распределение нормированной напряженности электрического поля в различные моменты времени. По горизонтальной оси отложен номер временного шага

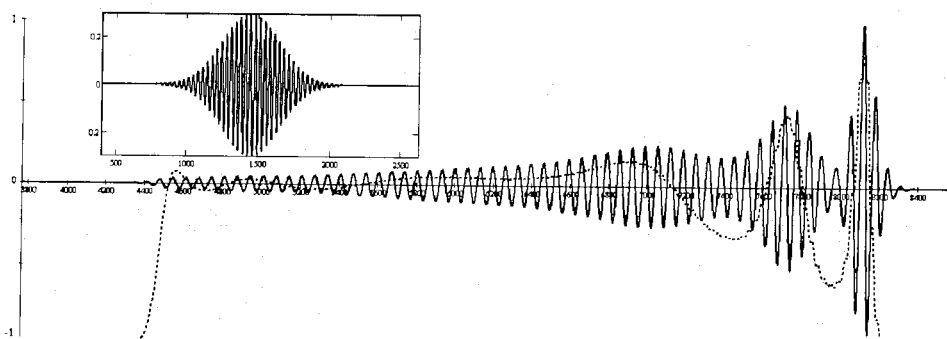


Рис. 3. Одномерное пространственное распределение нормированной напряженности электрического поля (сплошная линия) и плотности инверсии (штриховая линия)

Заключение

Рассмотренный в работе численный метод позволяет моделировать пространственно-временную динамику ультракоротких импульсов в двухуровневой активной среде с разрешением несущей частоты излучения. Результаты пробного моделирования позволили наглядно изучить динамику поля излучения, поляризации и плотности инверсии населенностей при образовании π -импульсов. Данный метод оперирует параметрами среды, которые могут быть измерены экспериментально, что делает его удобным для количественных расчетов. Ограничением метода является значительное время вычисления для моделей больших размеров. Отчасти это может быть компенсировано оптимизацией кода и увеличением вычислительной мощности за счет использования распределенных вычислений. Распространение метода на три пространственных измере-

ния не представляет принципиальных трудностей и позволит моделировать динамику ультракоротких импульсов в световых пучках и резонаторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Taflove, A.** The Finite-Difference Time-Domain Method / Allen Taflove, Susan C. Hagness – 2nd ed. – Boston: Artech House, 2000. – 850 p.
2. Ultrafast pulse interactions with two-level atoms / R.W. Ziolkowski [et al.] // Phys. Rev. A. – 1995 – Vol 52. – № 4. – P. 3082-3094.
3. FDTD Analysis of Wave Propagation in Nonlinear Absorbing and Gain Media / S. Nagra [et al.] // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1998 – Vol 46. – № 3. – P. 334-340.
4. **Siegman, E.** Lasers / E. Siegman. – Oxford: University Press, 1986. – 1200 p.
5. **Ален, Л.** Оптический резонанс и двухуровневые атомы / Л. Аллен, Дж. Эберли. – Москва: Мир, 1978. – 223 с.

Поступила в редакцию 09.02.2009 г.

УДК 612+57.042+57.043+574.24

**Н.В. АКУЛИЧ, Н.Г. КРУЧИНСКИЙ
В.А. ЛИВИНСКАЯ, С.Б. МЕЛЬНОВ**

ДИАГНОСТИКА ПРЕДВЕСТНИКОВ АТЕРОСКЛЕРОЗА В ДЕТСКОЙ ПОПУЛЯЦИИ

Исследованы клинические параметры здоровья детей и подростков г. Могилева, проживающих в экологически неблагоприятном районе города. Выявлено увеличение толщины комплекса “интима-медиа”, тесно коррелирующее с параметрами распределения эритроцитов и тромбоцитов по объему, с количеством эритроцитов и показателем гематокрита, что свидетельствует о связи атерогенеза с тромбоцито- и эритропоэзом. Повышенный уровень диастолического артериального давления в аффецированной группе прямо пропорционально зависит от уровня веществ со средней молекулярной массой и обратно коррелирует с количеством эритроцитов.

Введение

В условиях продолжающейся депопуляции, особенно в трудоспособном возрасте, проблема сохранения здоровья населения выходит на передний план среди других [1-4]. Бесспорно, что ведущая роль в заболеваемости, инвалидности и смертности людей трудоспособного возраста принадлежит сердечно-сосудистым и цереброваскулярным заболеваниям (ССЗ и ЦВЗ) [1, 3, 5, 6].

В 70-х гг. XX в. был доказан генетический механизм развития артериальной гипертензии (АГ) и ишемической болезни сердца (ИБС), в связи с чем в программы профилактических мероприятий стали входить семейные исследования с выявлением факторов риска (ФР) этих заболеваний среди детей больных родителей [1, 5, 7, 8].

С этой же причиной связано и усиление интереса к исследованию предвестников и ФР атеросклероза у детей и подростков [1, 5, 6]. Необходимость пристального внимания к особенностям развития сердечно-сосудистых заболеваний (например, сочетания некоторых факторов риска ССЗ у детей и подростков) обусловлена требованиями к проведению мероприятий по первичной профилактике сердечно-сосудистой и цереброваскулярной патологии [5, 9, 10, 11, 12, 13].

На основании полученных в течение многолетней работы данных [1, 3, 5] представляется целесообразным как можно более раннее выявление группы высокого риска развития ССЗ и ЦВЗ в крупных городах Республики Беларусь, в том числе и в зависимости от экологических условий проживания населения. Таким образом, **целью исследования** является внедрение методов ранней диагностики изменений состояния здоровья детей и подростков, проживающих в условиях хронических антропогенных нагрузок.

Материалы и методы

Объект исследования – 194 школьника в возрасте 10-14 лет, проживающих в городе Могилеве. Контрольную группу составили дети и подростки, проживающие на экологически благоприятных территориях г. Могилева, а основная группа наблюдения – дети и подростки, проживающие на экологически неблагоприятных территориях города.

Общеклиническое исследование. Артериальное давление измерялось в положении сидя, трижды на правом плече, с точностью до 2 мм рт. ст. Частота пульса измерялась за 30 с, масса тела – с точностью до 100 г, длина тела – до 1 см.

Биохимическое исследование. Определение общего холестерина производили фотометрически (фотометр “Solar” с электродом для определения глюкозы крови) при помощи метода холестеролоксидазного накожного теста, отражающего активность процесса в брюшной аорте с использованием раствора холестеролоксидазы с активностью 25 Ед/мл (“Merck”, Германия).

Инструментальное исследование. Ультразвуковое исследование толщины комплекса “интима-медиа” проводили с помощью линейного датчика 7.5 МГц, который располагали билатерально параллельно ходу *a. carotis communis* на всем ее протяжении до бифуркации.

Оценка нестабильности генома. Цитогенетический анализ и микроядерный тест проводили с использованием фитогемагглютинаина (ФГА) (Sigma, США). Фиксацию цитогенетических препаратов проводили фиксатором Карнуа, окрашивание производили по методу Романовского. Подсчет хромосомных aberrаций (ХА) производился при контрастировании объектов методом микроскопии светлого поля. Для анализа

использовались только клетки первого митоза. Уровень конденсации хромосом находился в следующих пределах: максимум – малые акроцентрики (АЦ) – четко выраженные структуры, минимум – в хромосомах видно две хроматиды, которые лежат отдельно друг от друга. Не допускался анализ хромосом в стадии пренафазы и при наличии метафазных пластинок с большим количеством наложений хромосом [4, 10, 14, 15, 16, 17].

Для микроядерного теста использовали культуральную смесь (RPMI-1640 – 100 мл, телячья эмбриональная сыворотка – 20 мл, гентамицин – 0.28 мл), в которую добавляли по 0.5 мл крови и 0.13 мл ФГА. Культивировали в течение 72 ч. За 24 ч до окончания культивирования в пробы вносили раствор цитохалазина-В – 5 мкл/4.5 мл культуры. В анализ брали биядерные клетки с общей сохранившейся цитоплазмой. Фиксировалась частота микроядер (МЯ), учитывая частоту клеток с одним, двумя, тремя и более МЯ на 1000 клеток от каждого обследуемого.

Гематологические исследования. Анализ крови проводили на полуавтоматическом гемоанализаторе Abacus (Австрия) и микроскопе проходящего света (Axio Imager A1, Германия), объектив Plan-Neofluar 100×1.3 Oil с видеокамерой “AxioCam Mrc5” (Германия) при помощи программы “Диаморф-ЦИТО” (Россия). Цитоиммунологические исследования реализованы на проточном цитофлуориметре Cell Lab Quanta SC (Beckman Coulter, США) с использованием моноклональных антител (Immunotech, Франция) и лизирующего раствора OptuLyse (Immunotech, Франция).

Статистическая обработка данных проводилась при помощи методов описательной статистики кластерного анализа, метода главных компонент, дискриминантного анализа и непараметрических методов [1].

Результаты и их обсуждение

Оценка экологической обстановки в г. Могилеве. По данным многолетних лабораторных исследований приземных концентраций в г. Могилеве, суммарный уровень загрязнения формируется в том числе и за счет специфических выбросов предприятий (диэтиловый эфир терефталевой кислоты, сероуглерод, сероводород, метанол и др.).

Общеизвестно, что с 1998 г. и по настоящее время уровень суммарного загрязнения атмосферного воздуха стабильно снижается и с гигиенических позиций на сегодняшний день загрязнение атмосферы оценивается как “допустимой степени” в целом по городу, как “допустимой” или “умеренной степени” по микрорайонам города. Тем не менее, необходимо признать, что антропогенный прессинг на момент рождения детей и подростков г. Могилева был довольно высоким и это, на наш взгляд, являлось дополнительным фактором риска сердечно-сосудистых и цереброваскулярных заболеваний. Следует обратить внимание на то, что по данным 2000 – 2008 г., среднегодовые концентрации загрязняющих веществ (метиловый спирт, фенол) в атмосферном воздухе оставались стабильно высокими и превышали предельно допустимую концентрацию (ПДК), а в отдельные дни концентрации этилбензола, п-ксило-

ла, м-ксилола, формальдегида, фенола, сероводорода превышали ПДК в несколько раз [8].

Анализ заболеваемости детской популяции. Существующие учетно-статистические данные не могут отражать показатели качества здоровья, поскольку они в основном вычисляются на основании “обращаемости”. Однако и эти показатели указывают на высокий уровень суммарной заболеваемости и ее распространенности.

Анализ результатов углубленных медицинских осмотров школьников показывает, что состояние их здоровья ухудшается, с каждым годом уменьшается число абсолютно здоровых детей, растет число с хроническими заболеваниями различных органов и систем. Показатель общей суммарной заболеваемости школьников по г. Могилеву имеет стойкую тенденцию к росту и может оцениваться как высокий (в некоторые годы на 20-25% выше среднеобластного и среднереспубликанского показателей). В частности, в г. Могилеве выше среднереспубликанского показателя в 1.2-1.3 раза заболеваемость органов дыхания, в 1.6-1.9 раза – заболеваемость психическими болезнями, болезнями органов пищеварения, травматизмом.

В структуре суммарной общей заболеваемости преобладают болезни органов дыхания (69.67%), далее идут травмы и отравления (8.52%), инфекционные заболевания (4.56%), болезни органов пищеварения (3.74%), болезни кожи (3.03%) и болезни глаз (2.57%) [8].

Уровень суммарной заболеваемости (всего) в городе по возрастным группам детей колеблется примерно следующим образом: заболеваемость детей до 1 года – на 8-10%, детей 1-4 года – на 40-45% выше среднегогородского показателя.

Таким образом, отмечено влияние ингаляционной химической нагрузки на растущий организм ребенка, что может привести к ухудшению показателей здоровья.

Оценка влияния условий проживания на встречаемость основных факторов риска развития атеросклероза. Корректность разбиения исходной совокупности на две группы в зависимости от территориального признака оценивалась с помощью методов многомерного статистического анализа.

Таблица 1

Протокол комплексного скринингового обследования детей г. Могилева

Вид обследования	Критерии для отбора в группу
Массовый профилактический осмотр	✓ Возраст
	✓ Жалобы
	✓ Оценка физического развития
	✓ Систолическое АД – АДс, диастолическое АД – АДд
Общеклиническое обследование	✓ Подробный сбор анамнеза
	✓ Определение исходного вегетативного статуса
	✓ Проба с дозированной физической нагрузкой
	✓ ЭКГ

Окончание табл. 1

Вид обследования	Критерии для отбора в группу
Развернутая гемограмма	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Гематокрит – Ht ✓ Гемоглобин – Hb ✓ Количество эритроцитов (RBC), 1Ч10¹²/л ✓ Средний объем эритроцита (MCV), фл ✓ Среднее содержание гемоглобина в эритроците (MCH), % ✓ Средняя концентрация гемоглобина в эритроците (MCHC), пг
Биохимические параметры	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Общий белок ✓ Билирубин ✓ Холестерин ✓ β-липопротеиды (β-ЛП) ✓ Триглицериды ✓ Вещества со средней молекулярной массой ✓ Аланинаминотрансфераза – АЛАТ ✓ Аспаратаминотрансфераза – АСАТ
Нестабильность генома	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Общее количество метафаз в анализе ✓ Количество aberrаций хромосомного типа ✓ Количество aberrаций хроматидного типа ✓ Общее количество aberrаций

Разработка и реализация протокола комплексного скринингового обследования детей и подростков ставила своей целью определение ранних критериев формирования групп риска по развитию сердечно-сосудистой и цереброваскулярной патологии атеросклеротического генеза, оптимизацию унифицированного подхода лечебно-профилактических учреждений к дальнейшему их ведению и возможной диспансеризации.

В результате внедрения протокола было установлено, что более высокий суммарный уровень заболеваемости (всего, впервые) регистрировался в зонах обслуживания поликлиник, где состояли на учете дети, проживающие в более неблагоприятных экологических условиях.

Биохимический анализ плазмы крови выявил достоверный (на 67%, $p < 0.02$) рост уровня β -ЛП, незначительное снижение ($p < 0.008$) концентрации альбумина и пятикратное повышение уровня веществ со средней молекулярной массой у детей и подростков, проживающих на экологически неблагоприятных территориях. Количество нитратов мочи повысилось на 158% ($p < 0.004$).

Исходный уровень артериального давления у детей и подростков основной группы наблюдения был более высоким по сравнению с контролем. Проведение ортостатической пробы показало, что прирост артериального давления (особенно диастолического) у детей основной группы выше, чем у детей контрольной группы. Толщина кожно-жировой складки, как на плече, так и под левой лопаткой у детей и подростков, проживающих на экологически неблагоприятных территориях г. Могилева, была большей ($p < 0.02$). Количество лейко-, лимфо- и эритроцитов находилось в пределах нормы. Вместе с тем обращает на себя внимание факт снижения на 17% количества эритроцитов среди детей и подростков основной группы ($p < 0.02$) в сочетании со снижением величины МСН

($p < 0.04$) по сравнению с контролем. В тоже время по некоторым параметрам различия отсутствовали и для доказательства правомерности разделения детской популяции г. Могилева на группы (две или более) в зависимости от условий проживания было проведено исследование с помощью методов многомерного статистического анализа. В ходе анализа нам предстояло доказать, что разбиение исходной совокупности на две группы в зависимости от территориального признака корректно.

Таблица 2

Корреляция между признаками в контрольной группе

	RBC	Hb	Ht	MCV	β -ЛП	MCH	АДс	АДд
RBC	1	0.16	0.17	-0.45	-0.51	-0.42	-0.07	-0.13
Hb		1	0.79	0.19	-0.08	0.24	0.15	0.00
Ht			1	0.46	-0.06	0.01	0.28	-0.01
MCV				1	0.35	0.62	0.28	0.09
β -ЛП					1	0.31	-0.19	0.06
MCH						1	0.13	0.02
АДс							1	-0.06
АДд								1

Таблица 3

Корреляция между признаками в основной группе

	RBC	Hb	Ht	MCV	β -ЛП	MCH	АДс	АДд
RBC	1	-0.08	0.10	0.06	-0.10	-0.05	-0.05	-0.27
Hb		1	0.15	0.15	-0.03	-0.05	0.15	0.06
Ht			1	0.40	-0.01	-0.20	0.08	-0.14
MCV				1	0.02	0.56	0.20	0.05
β -ЛП					1	0.10	-0.11	-0.02
MCH						1	0.13	0.16
АДс							1	0.09
АДд								1

Сопоставляя их (табл. 2-3), видим различие в наличии, силе и даже направлении связи между показателями RBC и MCV и MCH, Hb и Ht, Ht и АДс, MCV и АДд.

Проверку правильности классификации исходной информации проводили с помощью дискриминантного анализа, предварительно стандартизируя исходные факторы. Были получены 2 функции классификации (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты дискриминантной функции

	Контрольная группа ($p=0.27$)	Основная группа ($p=0.73$)
RBC	3.55	-1.60
Hb	0.33	-0.15
Ht	-0.50	0.11
MCV	0.86	0.21
β -ЛП	-5.24	1.69
MCH	0.99	-0.51
АДс	-1.68	0.65
АДд	-3.98	2.02
Constant	-10.31	-1.91

Таким образом, для каждого объекта и для каждой совокупности был определен вес классификации по формуле. Для контрольной группы он составил

$$Sk = -10.306 + 5.06RBC + 0.33Hb - 0.50Ht + 0.85MCV - 5.24 \beta\text{-ЛП} + 0.98MCH - 1.67АДс - 3.98АДд.$$

Для основной группы:

$$Sk = -1.906 - 1.60RBC - 0.15Hb + 0.11Ht + 0.21MCV + 1.68 \beta\text{-ЛП} - 0.51MCH + 0.65АДс + 2.02АДд.$$

Процент корректной классификации в контрольной и основной группах составил 100%, $p=0.28$ и $p=0.72$ соответственно. Таким образом, не представляет целесообразным проведение классификации новых наблюдений и наше разделение на группы в зависимости от условий проживания корректно, поскольку, в общем случае, наблюдение считается принадлежащим той совокупности, для которой получен наивысший показатель классификации.

Для выяснения, какие переменные различны в двух данных группах была оценена дискриминантная функция (табл. 5).

Таблица 5

Оценка дискриминантной функции

	Лямбда Уилкса	Коэффициент Фишера (1.12)	Значение p
RBC	0.18	50.66	0.0000
MCV	0.17	43.34	0.0000
β -ЛП	0.15	20.33	0.0000
MCH	0.14	12.30	0.0006
АДс	0.13	8.78	0.0037

Были определены коэффициенты для классификационных функций, использующих наиболее значимые факторы для каждой из групп, которые представлены в таблице 6.

Таблица 6

Коэффициенты классификационных функций

	Основная группа	Контрольная группа
RBC	1.73	-5.20
MCV	1.95	-3.97
β -ЛП	-1.54	3.33
MCH	0.67	-1.50
АДс	-0.37	1.46
Constant	-1.87	-10.07

Для определения объектов, которые можно объединить в группы с учетом близких значений по всем признакам, был проведен кластерный анализ исходной совокупности. С помощью итерационного метода К-средних установлено, что более значимо кластеры различаются по средним значениям признаков RBC и β -ЛП, АДд и АДс (рис. 1).

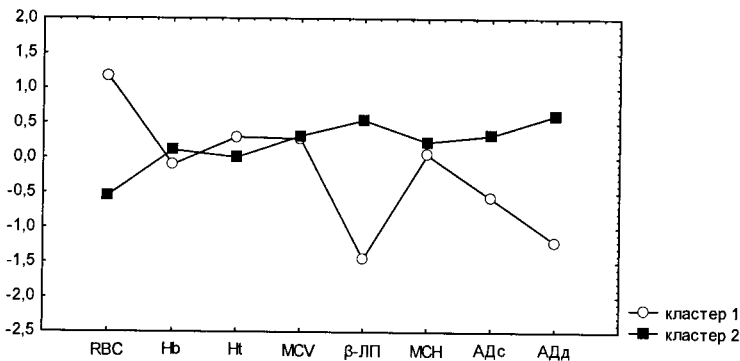


Рис. 1. График средних значений признаков для каждого кластера

При сопоставлении принадлежности кластерам и районам проживания, подтвердилось их совпадение. Поскольку, признаки являются мультикоррелированными (в таблице 7 приведена корреляционная матрица; значимые коэффициенты помечены *), необходимо выяснить зависимости между ними для снижения размерности признакового пространства с помощью метода главных компонент.

Таблица 7

Таблица корреляции признаков, сгруппированных в кластеры

	RBC	MCV	β -ЛП	MCH	АДс	АДд
RBC	1	-0.13	-0.77*	-0.20	-0.31*	-0.72*
MCV	-0.13	1	0.10	0.57*	0.26*	0.04
β -ЛП	-0.77*	0.10	1	0.15	0.31*	0.70*
MCH	-0.20	0.57*	0.15	1	0.14	0.11
АДс	-0.31*	0.27*	0.31	0.14	1	0.35*
АДд	-0.72*	0.037	0.70	0.11	0.35*	1

Собственные значения корреляционной матрицы, приведенные в таблице 8, показывают, что 84% общей вариации признаков могут быть описаны с помощью трех новых факторов (главных компонент), корреляция которых с исходными факторами-признаками показана в таблице 9.

Таблица 8

Результаты анализа главных компонент

	Собственные значения	% общей дисперсии	Кумулятивные собственные значения	Кумулятивные (%)
1	2.77	46.24	2.77	46.24
2	1.50	24.94	4.27	71.18
3	0.80	13.32	5.07	84.50
4	0.41	6.84	5.48	91.35
5	0.30	4.92	5.78	96.27
6	0.22	3.73	6.00	100.00

Таблица 9

Факторные нагрузки (значимые факторы помечены*)

	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
RBC	0.88*	-0.20	-0.18
MCV	-0.33	-0.83*	-0.02
β -ЛП	-0.86*	0.25	0.16
МСН	-0.38	-0.77*	0.31
АДс	-0.55	-0.16	-0.80*
АДд	-0.84*	0.30	0.05

Анализируя данные, представленные в таблице 9, необходимо отметить, что с первым фактором теснее всего связаны: количество эритроцитов, уровень β -ЛП, диастолическое и систолическое артериальное давление; со вторым – средний объем эритроцита и среднее содержание гемоглобина в эритроците; с третьим – систолическое артериальное давление. Дальнейший анализ может проводиться внутри каждой группы отдельно с использованием линейных комбинаций исходных признаков. При этом следует, что величина среднего объема эритроцита и среднее содержание гемоглобина в эритроците – зависимые переменные, поскольку содержание гемоглобина – относительно постоянная величина, а вариации МСН в основном определяются величиной MCV. Таким образом, для выделения двух переменных, относящихся ко второму фактору, нет оснований.

Выяснение механизмов, лежащих в основе зависимости роста артериального давления от количества эритроцитов и увеличения β -ЛП, проведено далее, а исходную статистическую совокупность правомерно разделить на 2 группы (рис. 2).

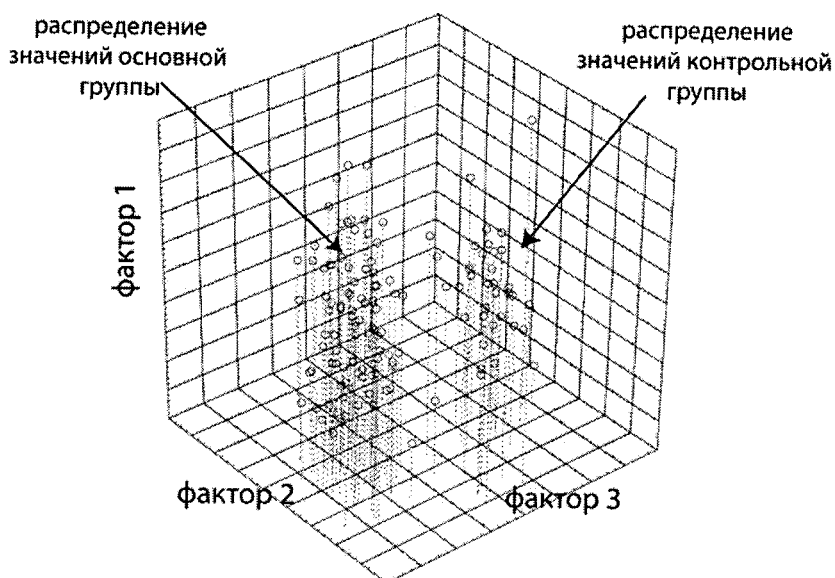


Рис. 2. Диаграмма рассеяния данных в пространстве главных компонент

Анализ результатов измерения толщины комплекса “интима-медиа”. Визуализация бифуркации общих сонных артерий детей, подвергающихся хроническим антропогенным нагрузкам, актуальна, поскольку в силу гемодинамических особенностей эта зона часто подвергается атеросклеротическим изменениям. В норме сонные артерии характеризуются гладким ровным контуром, однородным просветом и отчетливо пульсируют.

Проведенные исследования показали, что толщина комплекса “интима-медиа” хорошо коррелирует с данными, получаемыми при аутопсии, и тесно связана с условиями проживания детей и подростков г. Могилева. Утолщение комплекса свыше 1,0 мм при ультразвуковом обследовании хотя бы одной общей сонной артерии выявлено у 37,5% детей и подростков, проживающих в неблагоприятных экологических условиях г. Могилева, тогда как в контрольной группе таких изменений не наблюдалось. Тесная корреляционная связь ($r=74$, $p<0.05$) показателей ультразвукового исследования с условиями проживания детей и подростков указывает на системный характер выявленных атеросклеротических изменений.

Величина значения толщины комплекса “интима-медиа” коррелировала с другими клинико-лабораторными параметрами, характеризующими атерогенную опасность, которые могут быть сгруппированы следующим образом:

1. **Гематологические** – обратная статистически значимая корреляционная связь между толщиной комплекса “интима-медиа” и параметрами распределения эритроцитов ($r=-0.42$, $p=0.019$) и тромбоцитов ($r=-0.70$, $p<0.0001$) по объему. Кроме того, ультразвуковые параметры сосудис-

той стенки оказались закономерно связанными с количеством эритроцитов и показателем гематокрита ($p=0.02$ и $p<0.01$ соответственно). Это свидетельствует о связи атерогенеза с тромбоцито- и эритропоэзом.

2. Гемодинамические. Изменение толщины комплекса “интима-медиа” связано с параметрами центральной гемодинамики: корреляционный анализ показал статистически значимую связь между ультразвуковыми параметрами, характеризующими состояние каротидных артерий и показателями диастолической функции сердца.

Клинический анализ выявленных нарушений гомеостаза.

Исходный уровень артериального давления у детей основной группы был достоверно ($p<0.001$ Колмогоров-Смирнов) более высоким ($108.53\pm 3.70/71.86\pm 5.37$), в контрольной группе артериальное давление составляло $104.72\pm 3.41/60.02\pm 2.07$ мм рт. ст.

При проведении ортостатической пробы отмечался достоверно более высокий ($p<0.001$) прирост артериального давления (особенно диастолического) у детей основной группы по сравнению с контрольной.

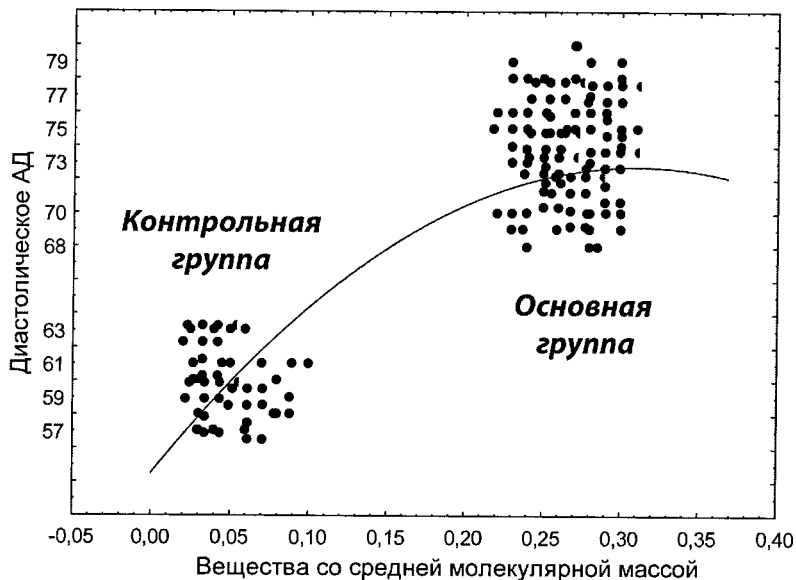


Рис. 3. Нелинейная полиномиальная модель зависимости диастолического артериального давления от содержания веществ со средней молекулярной массой

Проведенный нелинейный регрессионный анализ показал (рис. 3), что повышенный уровень диастолического артериального давления у детей и подростков основной группы зависит от уровня веществ со средней молекулярной массой ($r=0.67$; $p<0.001$). На графике значения из двух групп отчетливо сгруппированы в две различающиеся области, т.е. высокая концентрация веществ со средней молекулярной массой (показатель интоксикации и нарушения функций органов естественной детоксикации) сопровождается увеличением диастолического артериального

давления, которое, впрочем, не превышает возрастной нормы. Выявленные зависимости могут быть охарактеризованы и как компенсация эндогенной интоксикации за счет роста артериального давления.

Установлена обратная корреляционная связь диастолического артериального давления с количеством эритроцитов ($r=-0.73$; $p<0.001$). В контрольной группе при проведении аналогичного анализа были получены следующие зависимости: ($r=-0.08$; $p=0.69$) и ($r=-0.13$; $p=0.36$) соответственно.

Результаты цитогенетического анализа в детской популяции. В общей системе генетического мониторинга одним из ключевых направлений является использование цитогенетических методов [4, 7, 14, 15, 18], позволяющих оценивать темпы мутационных событий на хромосомном уровне. Известно, что по сравнению с анализом обменов сестринских хроматид (СХО) и микроядер (МЯ) учет структурных aberrаций хромосом в лимфоцитах периферической крови наиболее удобен для биоиндикации генотоксических эффектов в популяции человека. С одной стороны, это связано с его достаточно высокой чувствительностью, с другой – с прогностической значимостью в отношении риска опухолевого роста [15].



Рис. 4. Цитогенетический анализ популяции детей и подростков г.Могилева

Уровень показателей цитогенетического статуса детей и подростков, входящих в контрольную группу соответствует данным литературных источников (рис. 4). В частности, количество всех aberrаций не превышает 2%; основной вклад в сумму aberrаций вносят одиночные фрагменты – (ОФ) ($1.20 \pm 0.19\%$), и их частота варьирует в широких пределах (от 0.0 до 3.90%).

Парные фрагменты в среднем встречались с частотой $0.52 \pm 0.19\%$, что составляет 28% от общей частоты хромосомных aberrаций. Одиночные фрагменты и парные фрагменты являются неспецифическими хромосомными aberrациями в отношении мутагенных факторов и отражают состояние общей нестабильности генома [4, 14, 15, 19].

Выявленная в результате цитогенетического анализа детей и подростков контрольной группы суммарная частота хромосомных aberrаций (ХА), служащая интегральным показателем состояния генетического аппарата, составила 1.85 ± 0.25 на 100 исследованных метафаз, что незначительно превышает аналогичный показатель установленных норм контроля (от 0.95 [14, 16] до 1.5% [15, 19, 20, 21]).

Общее количество хромосомных aberrаций сопоставимо с числом aberrантных клеток (АК). Их соотношение в анализируемой группе составило 1.06:1 (то есть близко к 1:1), что свидетельствует о гомогенности воздействия мутационного фактора и подтверждает адекватность контрольной выборки.

Кроме того, генетическая нестабильность в контрольной группе проявилась и на геномном уровне. Отмечена повышенная частота полиплоидов – $0.16 \pm 0.09\%$. Такой тип особенностей хромосомного аппарата свидетельствует о нарушении процесса деления и в популяциях, неотягощенных действием мутагенных факторов. Встречается нечасто – 0.3% [4, 14, 15, 16]. Принимая во внимание, что вся популяция представлена городским населением, необходимо учитывать влияние факторов химической природы, характерных для г.Могилева (специфические выбросы крупных химических предприятий: параксилон, сероуглерод, сероводород, толуол и др.), которые могут оказывать цитотоксическое действие.

Таким образом, установленные в результате проведенного цитогенетического исследования показатели частот ХА соответствуют международным нормам контроля [4, 14, 15], что подтверждает возможность использования данной группы в качестве контроля при сравнении с аффецированной группой наблюдения.

По результатам, приведенным на рис. 4, видно, что в основной группе, больший вклад в общее количество ХА внесли одиночные фрагменты (ОФ) (50%) и парные фрагменты (ПФ) (35%). Частота их встречаемости в аффецированной группе варьировала в широких пределах – от 0 до 5.3% (частота ОФ) и от 0 до 4.3% (частота ПФ).

Уровень маркеров ионизирующего воздействия составил 0.26%, при этом доминирующим параметром являются дицентрики (ДЦ). Однако суммарное количество aberrаций – $4.00 \pm 0.34\%$ – достаточно высоко и более чем в 2 раза превышает аналогичный показатель для установленных норм [4, 13, 14, 15, 17]. Кроме того, в этой группе установлено нарастание aberrаций стабильного типа (“атипичные хромосомы”), что свидетельствует о повышении уровня генетического риска, так как они могут проходить “сито” митоза и передаваться по наследству в ряду клеточных генераций.

Соотношение общего числа ХА и АК в основной группе составило 1.10:1 и практически не отличалось от контроля (1.06; $p>0.1$), что свидетельствует о гомогенности воздействия мутагенных факторов. Общая частота ХА варьировала от 0 до 11.1% и в среднем в группе составила $4.00\pm 0.34\%$. Частота АК также варьировала в широких пределах (0-8.5%) с суммарной среднегрупповой частотой 3.62 ± 0.29 на 100 исследованных метафазных пластинок.

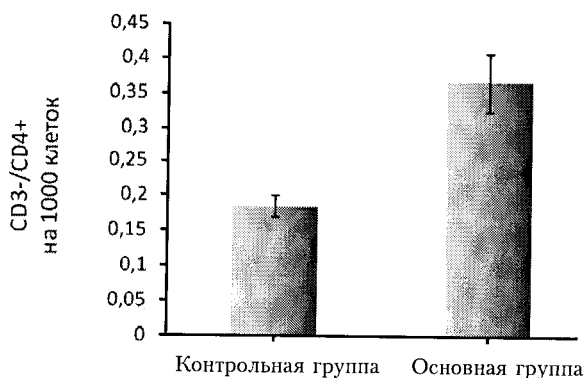


Рис. 5. Частота мутантных Т-хелперов

Более высокая частота мутантных Т-хелперов (рис. 5) наряду с другими изложенными выше цитогенетическими признаками дефекта иммунной системы свидетельствует о вероятном увеличении частоты генных мутаций в аффекированной группе относительно контроля. Поскольку в этой же группе статистически достоверно более высокой оказалась и частота микроядер (неспецифичный тест, свидетельствующий о наличии любого мутагенного воздействия), то можно предположить, что факт проживания в менее комфортных экологических условиях является причиной нарушений гомеостаза в результате воздействия хронических антропогенных нагрузок.

Заклучение

1. Любой из факторов риска атеросклероза обладает в отдельности крайне малой статистической мощью. Значения некоторых из них могут и не выходить за пределы так называемых “нормальных” или “средних” величин. Выявленные с помощью многомерных методов статистического анализа, новые интегральные факторы риска могут предсказать развитие атеросклероза с высокой степенью вероятности. На основании математических расчетов могут быть сформированы группы детей с высоким риском атеросклероза.

2. В результате проведения скринингового и углубленного обследования популяции детей и подростков г. Могилева установлено увеличение толщины комплекса “интима-медиа”, тесно коррелирующее с условиями их проживания. Выявленная обратная статистически значимая

корреляционная связь между толщиной комплекса “интима-медиа” и параметрами эритроцитов и тромбоцитов, что свидетельствует о связи атерогенеза с тромбоцито- и эритропоэзом.

3. Доказано, что повышение диастолического артериального давление у детей и подростков г. Могилева, проживающих в экологически неблагоприятном районе, зависит от уровня веществ со средней молекулярной массой и обратно коррелирует с количеством эритроцитов. В группе детей и подростков Могилева отмечаются признаки геномной нестабильности: повышенный уровень дицентрических и кольцевых хромосом и полиплоидных клеток. У детей, проживающих в экологически неблагоприятных условиях, статистически достоверно более высокой оказалась частота микроядер, чем у детей контрольной группы.

4. На основании полученных в течение многолетней работы данных необходимо как можно раньше выявлять группы высокого риска развития сердечно-сосудистых и цереброваскулярных заболеваний в крупных городах республики, в том числе и в зависимости от экологических условий проживания населения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Акулич, Н.В.** Нарушения гомеостаза при хронических антропогенных нагрузках / Н.В. Акулич, А.В. Сорока, Н.Г. Кручинский // Медико-биологические последствия чернобыльской катастрофы: материалы Международной научной конференции, Гомель, 15-16 октября 2009 г. / Гомель Институт радиологии. – С. 8-11.
2. Анализ аберраций хромосом и СХО у детей из радиационно-загрязненных районов Украины / И.М. Елисева [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1994. – Т. 34. – № 2. – С. 163-171.
3. Биохимические показатели состояния здоровья детей из районов радиационного и химического загрязнения / Г.А. Суханова [и др.] // Клиническая лабораторная диагностика. – 1997. – № 6. – С. 46.
4. **Воробцова, И.Е.** Стабильные хромосомные аберрации в лимфоцитах периферической крови лиц, пострадавших в результате аварии на ЧАЭС / И.Е. Воробцова, А.Н. Богомазова // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1995. – Т. 38. – № 5. – С. 636-640.
5. Высокий риск атеросклероза у школьников Могилева / Н.В. Акулич [и др.] // Вестник Российской военно-медицинской академии. – 2008. – № 3(23). – С. 35.
6. **Маляренко, Т.Н.** Состояние здоровья школьников в зависимости от экологической ситуации в разных районах города / Т.Н. Маляренко, С.Д. Антонюк // Экол. Антропол.: Ежегод. – Изд-во Белор. Комит. “Дзеці Чарнобыля”. – Мн., 1996. – С. 248-250.
7. Изучение экологически обусловленной патологии в регионах и населенных пунктах (аналитический обзор) / С.В. Нагорный [и др.] // Мед. труда и пром. экол. – 1999. – № 2. – С. 26-31.
8. Информационные материалы об основных показателях санитарно-эпидемиологической ситуации в г. Могилеве / В.К. Шуляк [и др.]. – Могилев, 2001. – 80 с.
9. Результаты изучения эколого-зависимых отклонений в состоянии здоровья детей дошкольного возраста / И.Н. Ильченко, Ю.И. Прокопенко, В.П. Ильин, Е.В. Заикин // Педиатрия. – 1999. – № 3. – С. 88-93.

10. **Соленова, Л.Г.** Индикаторы здоровья для решения некоторых проблем экологии человека и гигиены окружающей среды / Л.Г. Соленова [и др.] // Гиг. и санит. – 2004. – № 6. – С.11-13.
11. **Хаитов, Р.М.** Экологическая иммунология / Р.М. Хаитов, Б.В. Пинегин, Х.И. Истамов – М., 1995. – 177 с.
12. **Щеплягина, Л.А.** Подходы к оценке воздействия на детей промышленного загрязнения окружающей среды / Л.А. Щеплягина // Мед. труда и пром. экол. – 1999. – № 9. – С. 27-30.
13. **Эйдус, Л.Х.** Проблемы механизма радиационного и химического гормона / Л.Х. Эйдус, В.Л. Эйдус // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2001 – Т. 41. – № 5. – С. 627-630.
14. **Пилинская, М.А.** Радиоиндуцированные цитогенетические маркеры, обнаруженные через 8 лет после аварии на ЧАЭС при различных способах анализа препаратов метафазных хромосом у лиц, перенесших острую лучевую болезнь / М.А. Пилинская, Е.В. Шеметун, Ф.М. Шеметун // Цитология и генетика. – 1995. – Т. 29. – № 5. – С. 3-11.
15. Цитогенетическое обследование детей Санкт-Петербургского региона, пострадавших в результате аварии на ЧАЭС. Частота нестабильных хромосомных aberrаций в лимфоцитах периферической крови. / И.Е. Воробцова [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1995. – Т. 35. – № 5. – С. 630-635.
16. Частота aberrаций хромосом в лимфоцитах детей с заболеваниями щитовидной железы, проживающих в Брянской области / Е.К. Хандогина [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1995. – Т. 35. – № 5. – С. 626-629.
17. Genetic consequences of the Chernobyl accident in Belarus Republic / G. Lazjuk [et al.] // Research Activities about the Radiological Consequences of the Chernobyl NPS Accident and Social Activities to Assist the Sufferers by the Accident / Ed.: T. Imanaka. – Research Reactor Institute. – Kioto, 1988. – P. 174-177.
18. **Рахманин, Ю.А.** Донозологическая диагностика в проблеме окружающей среда – здоровье населения / Ю.А. Рахманин, Ю.А. Ревазова // Гиг. и санит. – 2004. – № 6. – С. 3-5.
19. **Шубик, В.М.** Иммунологические изменения при сочетанном воздействии хронического γ -облучения в малых дозах и токсических веществ / В.М. Шубик, И.А. Зыков // Мед. радиология. – 1981. – Т. 26. – № 9. – С. 44-48.
20. **Щербо, А.П.** О проблеме эколого-гигиенических маркеров в аспекте доказательной медицины / А.П. Щербо, А.В. Киселев // Гиг. и санит. – 2004. – № 6. – С. 5-8.
21. Эритроцитометрия в диагностике нарушений гемоглинообразования / Прокопович А.С., Воробей Е.В., Громова А.И., Акулич Н.В., Гольдинберг Б.М., Кручинский Н.Г. // Клиническая лабораторная диагностика. – 2004. – № 1. – С. 40.

Работа выполнена в рамках реализации проекта Региональной научно-технической программы “Развитие Могилевской области” при финансовой поддержке Могилевского областного исполнительного комитета.

УДК 599.323.45:[591.111.7:577.121.4].033:537.531:621.395.721.5

Д.Р. ПЕТРЕНЕВ

ИЗМЕНЕНИЯ В ОКИСЛИТЕЛЬНОМ МЕТАБОЛИЗМЕ ПЕРИТОНЕАЛЬНЫХ МАКРОФАГОВ У МОЛОДЫХ КРЫС ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗЛУЧЕНИЯ СОТОВЫХ ТЕЛЕФОНОВ СТАНДАРТА GSM 900 MHz

Изучены эффекты двухнедельного облучения молодых крыс Вистар электромагнитным полем, имитирующим сигнал сотового телефона стандарта GSM 900 МГц в режиме разговора. После отмены действия фактора наблюдали усиление базального уровня продукции активных форм азота и кислорода резидентными перитонеальными макрофагами. При этом консервативные функции макрофагов, такие как фагоцитоз и ответ на стимуляцию бактериальным эндотоксином и форболовым эфиром, сохранялись в пределах нормы. В статье обсуждается гипотеза о связи усиленной эндогенной продукции свободных радикалов с увеличением рисков генотоксических эффектов воздействия неионизирующих электромагнитных излучений.

Ключевые слова: *неионизирующие электромагнитные излучения, биологические эффекты, активные формы кислорода и азота, макрофаги.*

Введение

Существуют сведения о повышении риска злокачественных новообразований, а также о выраженных изменениях нервной и эндокринной систем у населения и персонала, подвергающегося хроническому воздействию электромагнитного излучения (ЭМИ) различного диапазона. Многие аспекты воздействия ЭМИ остаются спорными и активно изучаются [1]. Обобщением результатов 11 крупных эпидемиологических исследований является вывод об увеличении риска новообразований при ежедневном использовании мобильного телефона более одного часа. Было установлено, что регулярное ежедневное использование сотового телефона повышает риск возникновения опухолей головного мозга и внутреннего уха [2]. Данные некоторых эпидемиологических исследований свидетельствуют, что длительное использование телефона более 10 лет удваивает риск возникновения акустической невромы в облучаемой части головы [3]. Однако механизмы опухолеобразования при воздействии неионизирующих излучений во многом остаются неизвестными, в основном в связи с недоказанностью механизмов развития генотоксических эффектов воздействия ЭМИ.

Отдельный интерес представляют вопросы различий в реакциях организма детей и взрослых на воздействие неионизирующих излучений. Несмотря на отсутствие подтвержденных данных о том, что дети более подвержены действию ЭМИ мегагерцового диапазона, чем взрослые,

особую тревогу вызывает активное использование сотовой связи детьми и подростками [4]. Предполагается, что они будут подвергаться значительно более интенсивному, чем предыдущие поколения, воздействию ЭМИ радиочастотного диапазона беспроводных сервисов. При этом последствия хронического воздействия ЭМИ на здоровье формирующегося организма изучено недостаточно хорошо. Ранее было показано, что дети по сравнению со взрослыми более чувствительны к индукции лейкозов при воздействии электромагнитных полей частоты 50 Гц [5]. Более того, известно, что уровень половых стероидов может в значительной степени модифицировать реакции организма на воздействие различных средовых факторов, в том числе и радиационного. В связи с этим изучение различий радиочувствительности детей и взрослых, а также исследование механизмов реализации канцерогенных эффектов ЭМИ, являются важнейшими направлениями современной радиобиологии неионизирующих излучений.

Говоря о возможных канцерогенных эффектах воздействия ЭМИ необходимо отметить, что предпосылки канцерогенеза могут быть как генетическими, так и средовыми [6]. В соответствии с устоявшейся парадигмой генетические повреждения являются необходимым условием возникновения новообразований. Тем не менее, в последнее время значительное внимание уделяется роли микроокружения в неопластических процессах [7-8], при этом воспаление рассматривается как важный патогенетический фактор [9], так как сопутствующие изменения в метаболических процессах характеризуются усилением продукции свободных радикалов клетками. Эти соединения влияют на внутриклеточную сигнализацию [10] и приводят к увеличению скорости спонтанного мутагенеза [11], снижению эффективности репарационных систем [12] и увеличению вероятности возникновения генетических аномалий [13].

На сегодня известно, что воздействие ЭМИ диапазона сотовой связи вызывают значительные изменения в функционировании клеток иммунной системы [14]. Также доступны отрывочные сведения о метаболических и биохимических изменениях, свидетельствующих об усилении продукции свободных радикалов клетками различной локализации при воздействии излучений мобильных телефонов [15-16]. Эти данные, взятые вместе с указанными выше предпосылками, определили цель работы: изучить функциональные показатели резидентных макрофагов при длительном воздействии ЭМИ сотовых телефонов.

Особое внимание в работе было уделено окислительному метаболизму макрофагов (как важнейших клеток, участвующих в развитии и разрешении воспалительной реакции), в частности, их способности продуцировать активные формы кислорода (АФК) и азота (АФА). Наряду с провоспалительными цитокинами эти высокореактивные соединения являются кластогенными факторами [10, 17] и играют важную роль в формировании немишленных, опосредованных эффектов воздействия на организм ионизирующих [13] и, предположительно, неионизирующих излучений.

Материалы и методы

Содержание животных и схема эксперимента: Исследование проводили на молодых крысах самцах, возраст которых на начало эксперимента составил 2,5 месяца, что соответствует пубертатному периоду. Животные (7-8-е поколение от племенных крыс линии “Вистар”) были получены из вивария ГУ НПЦ “Институт фармакологии и биохимии” г. Минск, РБ. Экспериментальных животных в течение двух недель подвергали действию электромагнитного поля, имитирующего сигнал сотового телефона в режиме разговора. В соответствии со схемой эксперимента, представленной на рисунке 1, облучение производили в дневное время двумя интервалами по 4 часа с перерывом в 1 час. На 8-е сутки после начала облучения и через 1, 7, 14 и 21 суток после завершения облучения животных брали в эксперимент (8-е, 15-е, 22-е, 29-е и 35-е сутки эксперимента). В эти же сроки в качестве контроля брали интактных животных того же возраста и пола, которые содержались в аналогичных условиях и получали идентичное питание.

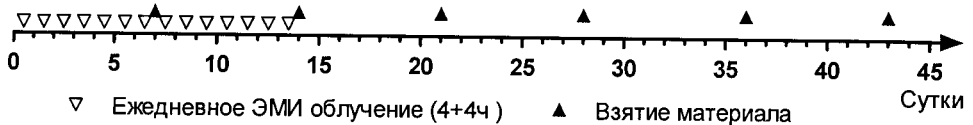


Рис. 1. Схема эксперимента по изучению длительного воздействия электромагнитных излучений (ЭМИ) сотовых телефонов стандарта GSM 900 МГц

Режимы облучения животных: Источником ЭМИ являлась установка, имитирующая сигнал мобильного телефона в режиме разговора. В качестве излучателя ЭМИ, сформированного в соответствии со стандартом GSM, применялась штыревая четвертьволновая антенна, соединенная коаксиальным кабелем длиной 5 м с антенным разъемом на телефоне распространенной марки. Антенна размещалась на высоте 0,35 м в центральной части рабочей зоны, имеющей размеры 1x0,7 м. В зоне находилось 4 пластиковые клетки с экспериментальными животными (8 жив. /кл.). Плотность потока электромагнитной энергии в клетке, измеренная прибором ПЗ-30 на частоте 900 МГц, находилась в пределах 0,2-0,3 мкВт/см².

Для выбора режима работы телефона использовали сервисное программное обеспечение производителя. Произвольную последовательность нулей и единиц передавали на 35 канале GSM (897,2 МГц), при величине излучаемой мощности телефона 77% от максимальной (AFC 36, AGC 512 (89dB), TX power 8, 18-5 min-max). Во время облучения осуществлялся дистанционный контроль наличия электромагнитного поля. Для этого в 15 см от излучающей антенны устанавливали дополнительную штыревую антенну, соединенную коаксиальным кабелем со входом измерительного прибора В7-26 (СССР).

Изучение клеточных показателей: Для изучения окислительного метаболизма фагоцитов нами была выбрана популяция резидентных (непривлеченных) клеток перитонеальной полости, что позволило выявить в культуре *ex vivo* изменения в состоянии клеток, которые происходят при воз-

действию изучаемого фактора на целостный организм. Для решения задач исследования мы использовали проверенную ранее модель оценки состояния макрофагальной системы [18], основанную на исследовании функциональных показателей резидентных перитонеальных макрофагов без стадий очистки (лизиса примеси эритроцитов, центрифугирования, ресуспензирования), т.е. в присутствии аутологичных тканевых факторов и других типов клеток перитонеальной полости, участвующих в кооперационных взаимодействиях при формировании функционального ответа на различные воздействия. Таким образом, функциональные показатели клеток были оценены в условиях, максимально приближенных к живому организму, – в системе *ex vivo* в различные сроки после воздействия ЭМИ *in vivo*.

Общую популяцию резидентных клеток перитонеальной полости выделяли при помощи лаважа, используя раствор Хенкса (рН 7.4) с ионами Ca^{2+} и Mg^{2+} , без фенолового красного (0,5% Antibiotic/antimicotic cocktail, Sigma; 10 мМ НЕРЕС, Promega; гепарин 2,5 ед./мл). Концентрацию клеток определяли на гематологическом анализаторе МЕК-6318J/К (NIHON KONDEN). Полученные результаты использовали для нормализации и расчета удельных показателей клеток.

Суммарную метаболическую активность клеток оценивали по скорости восстановления 3-[4,5-диметилтиазол-2-ил]-2,5-дифенилтетразолия бромида (МТТ, Sigma) [19]. Для этого после 2-часовой инкубации клеток при 37°C и 5% CO_2 в присутствии МТТ (0,5 мг/мл) удаляли инкубационную среду (р-р Хенкса), прибавляли 200 мкл смеси этанол:диметилсульфоксид (1:1), перемешивали для полной экстракции формозана и измеряли оптическую плотность на длине волны 570 нм с коррекцией на 650 нм.

Уровень базальной и стимулированной форболовым эфиром (33 нМ, РМА, Sigma) продукции АФК в свежевыделенных резидентных перитонеальных макрофагах оценивали по интенсивности люминол-усиленной хемилюминесценции [17] в присутствии пероксидазы хрена (3 Ед./мл) и 0.1 мМ азида натрия [20]. Измерения проводили в белых плоскодонных 96-луночных планшетах CELLSTAR (Grainer bio-one Inc.) на приборе INFINITE M200 (TECAN).

Уровень базальной и стимулированной эндотоксином (250 нг/мл, *E. coli* серотип 055.B5, Fluka) продукции АФА определяли по накоплению нитрита в суточных культурах перитонеальных клеток в системе, состоящей из 100 мкл суспензии клеток ($2-4 \times 10^5$ кл.) и 100 мкл культивационной среды (DMEM без фенолового красного, Sigma; 5% FBS, Invitrogen; 1% Antibiotic/antimicotic cocktail, Sigma). Концентрацию нитрита определяли в реакции с модифицированным реактивом Грисса [21], который готовили *Ex tempore*, смешивая равные части 0.35% 4,4-diamino-di phenylsulfone (Fluka) и 0.1% N-(1-naphthyl)-ethyldiamine (Sigma) в 5% H_3PO_4 . По соотношению спонтанного и индуцированного уровней продукции АФК и АФА рассчитывали коэффициенты, отражающие функциональную активность фагоцитов и способность клеток отвечать на соответствующую стимуляцию.

Для оценки фагоцитоза 100 мкл суспензии перитонеальных клеток вносили в круглодонные 96-луночные планшеты для суспензионных культур (Sarstedt, Inc.), инкубировали 1 ч при 37°C и 5% CO₂ для нормализации показателей клеток. Добавляли 100 мкл суспензии *E. coli* меченых FITC, которые предварительно были опсонизированы в течение 30 мин пулом крысиных сывороток при 37°C и дважды отмыты раствором Хэнкса. Инкубировали планшеты 30 мин при 37°C и 5% CO₂. Фагоцитоз останавливали добавлением 100 мкл стоп-раствора (10 mM NaF, 1% БСА на ра-ре Хэнкса) и анализировали на проточном цитометре Cytomics FC500 (Beckman Coulter, USA) с использованием программного обеспечения CPX (Beckman Coulter, USA). Зрелые макрофаги определяли по показателям прямого и бокового светорассеивания в популяции CD45⁺ клеток перитонеальной полости. Для определения CD45⁺ клеток использовали мышиные антитела, распознающие крысиный пан-лейкоцитарный антиген CD 45 (Clone: OX-1; CALTAG™), меченые красителем TriColor (FL4). По интенсивности сигнала на канале FL1 (FITC) определяли интенсивность фагоцитоза и процент фагоцитирующих клеток.

Спектрофотометрические измерения проводили в прозрачных плоскодонных 96-луночных планшетах (Sarstedt, Inc.) на приборе Safire² (TECAN). Первичную обработку данных проводили в программном комплексе Magellan 6.5 (TECAN). Для обработки данных и статистического анализа применяли пакеты программ Excell (Microsoft Inc.) и Prism 5 (GraphPad Software, Inc.). Достоверность отличий от контроля определяли с использованием критерия Манна-Уитни (U-test).

Результаты и обсуждение

В данном исследовании, выполненном на животных пубертатного периода (соответствует возрасту полового созревания), отмечали ряд эффектов воздействия ЭМИ на функциональное состояние свежевыделенных резидентных перитонеальных макрофагов. Как следует из данных, представленных в таблице, наиболее выраженные изменения наблюдали в уровне базальной продукции АФА и АФК клетками перитонеальной полости. Так, продукция АФА перитонеальными макрофагами была выше контрольных значений в течение всего срока наблюдений и нормализовывалась только через месяц после окончания воздействия, что свидетельствует о долгосрочной активации резидентных макрофагов после воздействия ЭМИ. При оценке базального уровня продукции АФК наблюдали аналогичные тенденции, однако изменения не были монотонными (см. табл.).

Наряду с изменениями в количестве клеток перитонеальной полости в ранние сроки (1-е сутки) после отмены фактора наблюдали изменения в динамике ответа перитонеальных макрофагов облученных животных на стимуляцию форболовым эфиром по сравнению с показателями клеток, полученных от контрольных животных (рис. 2а). При этом первичная вспышка (40 мин), обусловленная продукцией супероксидрадикала, синглетного кислорода и перекиси водорода, отличалась ускоренной динамикой

кой и повышенной интенсивностью в макрофагах, полученных от облученных животных. Динамика повторного увеличения интенсивности люминесцентного сигнала после 40 мин (соответствует процессу дегрануляции и высвобождению пероксидаз из гранул) изменялась незначительно. Эти данные свидетельствуют, что воздействие ЭМИ в изученных режимах влияет на процессы передачи сигнала клетками. При этом преимущественно затрагиваются механизмы сборки активного комплекса НАДФ*Н оксидазы и активации протеинкиназы С. Как видно из рисунка 2b, через две недели после отмены фактора динамика ответа клеток на стимуляцию восстанавливалась и отличалась лишь интенсивностью.

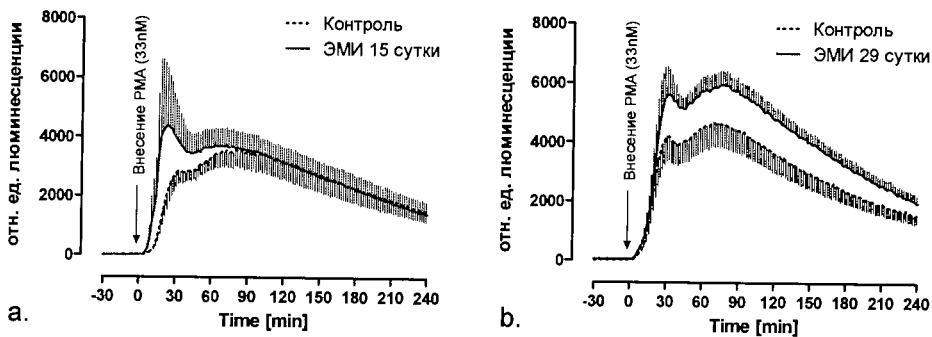


Рис. 2. Динамика стимулированной форболовым эфиром (РМА) продукции АФК резидентными перитонеальными макрофагами крыс на 1-е (а) и 15-е (б) сутки после двухнедельного воздействия ЭМИ 900 МГц. Данные представлены как среднее по группе. Вертикальные штрихи над и под линией (Контроль) обозначают ошибку среднего ($n=5$)

Следует отметить тот факт, что коэффициент стимуляции продукции АФА и АФК, т.е. функциональный, ответа на стимуляцию бактериальным эндотоксином и форболовым эфиром был снижен в клетках, полученных от облученных животных (см. табл.). Тем не менее, абсолютный уровень стимулированной продукции АФА клетками сохранялся в пределах нормы. При этом интенсивность фагоцитоза, оцененная по поглощению *E. coli*, меченых FITC, значительно не изменялась во все сроки исследования. Этот факт свидетельствует об отсутствии эффектов воздействия ЭМИ в изученных режимах на способность макрофагов к захвату микроорганизмов. Эффективность фагоцитоза (лизирующую и цитотоксическую способность) не оценивали.

Значение вышеприведенных данных об изменениях показателей окислительного метаболизма перитонеальных макрофагов после воздействия ЭМИ 900 МГц становится очевидным, если уровень удельной базальной продукции АФК и АФА умножить на количество клеток перитонеальной полости, после чего полученную «суммарную» продукцию АФК/АФА нормализовать по весу животных (Рис. 3). Этот рассчитанный показатель демонстрирует, что продукция АФК и АФА на единицу массы тела повышается после воздействия ЭМИ сотовых телефонов в изу-

ченних режимах. Анализ этих данных выявил достоверную связь усиления базальной продукции АФА макрофагами с воздействием изучаемого фактора ($P=0.0155$, Two Way ANOVA). Мы предполагаем, что эти изменения в окислительном метаболизме макрофагов являются одним из возможных механизмов реализации канцерогенных эффектов воздействия ЭМИ.

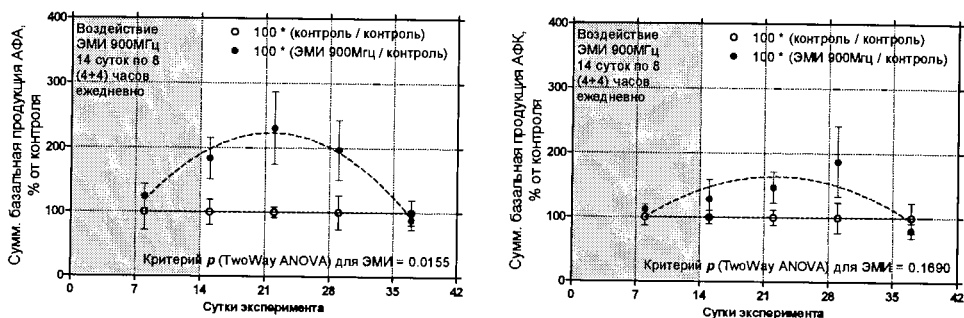


Рис. 3. Динамика суммарного уровня продукции АФА (а) и АФК (б) перитонеальными макрофагами нормализованный по весу животных после воздействия ЭМИ 900 МГц. Данные представлены как среднее и ошибка среднего ($n=5$). Темная область (до 14 суток) соответствует периоду воздействия ЭМИ, светлая область (14-42-е) сутки – периоду отмены действия фактора

Если рассматривать наши результаты в ключе возможных различий чувствительности детского и взрослого организма к воздействию ЭМИ сотовых телефонов, то необходимо упомянуть, что ранее в аналогичном описываемому в данной статье исследовании, выполненном на взрослых животных (возраст 7 мес.), нами было установлено, что в период воздействия ЭМИ базальная продукция АФА перитонеальными макрофагами была снижена на 10-15 %, а после отмены действия фактора этот показатель стабильно возрастал на 15-20% [22], однако отличия от контроля не были достоверными. Кроме того, при оценке ответа перитонеальных макрофагов на стимуляцию форболовым эфиром на 10-е сутки после отмены фактора наблюдали значительные изменения в динамике и характере кислородной вспышки. Также были установлены увеличение на 10-15% клеточности селезенки и фазовые изменения количества клеток перитонеальной полости после отмены действия фактора. Совокупность этих данных демонстрирует что изменения во взрослом организме после воздействия ЭМИ сотовых телефонов носят компенсаторно-приспособительный характер и являются проходящими. У молодых животных в текущем исследовании эффекты были более выраженными, и восстановление проходило в течение месяца после отмены действия ЭМИ. Таким образом, наши экспериментальные данные подтверждают, что биологические эффекты воздействия ЭМИ сотовых телефонов на организм в период полового созревания могут быть более выраженными по сравнению со сформировавшимся организмом. Причины этих различий еще предстоит выяснить.

**Показатели окислительного метаболизма клеток перитонеальной полости
в контроле и у животных при действии ЭМИ 900 МГц
в течение 14 суток по 8(4+4) часов ежедневно**

Наименование показателя	Срок	Контроль			ЭМИ 900 МГц				P
		Средн.	Ст.откл.	N	Средн.	Ст.откл.	N	% от контроля	
Относительное количество резидентных перитонеальных макрофагов, 10 ⁶ кл. / 100 г	7+1	10,239	3,039	5	10,748	2,806	4	105	0,402
	14+1	11,619	1,583	5	11,027	5,753	5	94,9	0,415
	14+7	13,132	2,799	5	14,822	2,648	5	112,9	0,178
	14+14	16,325	4,583	5	13,54	5,077	5	82,9	0,195
	14+22	10,963	2,741	5	10,898	3,05	5	99,4	0,486
Общая метаболическая активность (МТТ-тест), OD ₅₇₀ *10 ⁶ кл. ⁻¹ *1ч ⁻¹	7+1	0,759	0,056	5	0,676	0,019	4	89,1	0,013
	14+1	0,662	0,032	5	0,7	0,051	5	105,7	0,099
	14+7	0,645	0,033	5	0,631	0,034	5	97,9	0,266
	14+14	0,741	0,167	5	0,724	0,049	5	97,7	0,416
	14+22	0,633	0,059	5	0,684	0,043	5	108	0,08
Коэффициент стимуляции (МТТ-тест)	7+1	1,575	0,274	5	1,507	0,257	4	95,6	0,356
	14+1	1,426	0,139	5	1,326	0,154	5	93	0,156
	14+7	1,379	0,229	5	1,374	0,108	5	99,6	0,483
	14+14	1,687	0,125	5	1,495	0,172	5	88,6	0,039
	14+22	1,456	0,144	5	1,581	0,177	5	108,6	0,127
Базальная продукция АФК, усл.ед. люм. *10 ⁶ кл. ⁻¹ *1ч ⁻¹	7+1	2170,09	403,863	5	2403,73	615,518	4	110,8	0,257
	14+1	2564,18	527,864	5	3731,76	1581,97	5	145,5	0,078
	14+7	2973,47	1694,94	5	2755,67	1051,65	5	92,7	0,407
	14+14	3175,54	1405,5	5	6794,25	1796,09	5	214	0,004
	14+22	3121,66	1602,24	5	2536,27	573,908	5	81,2	0,232
Коэффициент стимуляции продукции АФК	7+1	25,07	12,604	5	16,386	13,701	4	65,4	0,178
	14+1	7,207	3,321	5	4,183	1,704	5	58	0,054
	14+7	1,889	0,372	5	1,876	0,397	5	99,3	0,48
	14+14	10,108	4,592	5	6,934	1,681	5	68,6	0,092
	14+22	20,564	6,231	5	28,261	17,019	5	137,4	0,185
Базальная продукция АФА, отн.ед.люм. *10 ⁶ кл. ⁻¹ *1ч ⁻¹	7+1	8,152	4,689	5	10,54	4,849	4	129,3	0,239
	14+1	6,547	2,748	5	14,025	4,913	5	214,2	0,009
	14+7	4,374	1,163	5	9,305	6,247	5	212,7	0,06
	14+14	4,75	2,783	5	10,821	4,241	5	227,8	0,014
	14+22	6,379	2,973	5	5,635	1,91	5	88,3	0,325
Коэффициент стимуляции продукции АФА	7+1	4,149	2,511	5	1,855	0,556	4	44,7	0,06
	14+1	3,571	1,728	5	1,733	0,448	5	48,5	0,025
	14+7	3,065	0,424	5	2,108	1,351	5	68,8	0,085
	14+14	2,678	1,562	5	1,805	0,623	5	67,4	0,14
	14+22	2,759	1,006	5	2,857	0,904	5	103,6	0,438
Доля фагоцитирующих клеток перитонеальной полости, % от общего кол-ва	7+1	57,332	8,233	5	57,955	7,087	4	101,1	0,236
	14+1	51,67	5,018	5	58,156	7,379	5	112,6	0,26
	14+7	46,532	2,689	5	45,914	5,099	5	98,7	0,244
	14+14	31,002	4,414	5	43,29	4,8	5	139,6	0,025
	14+22	36,403	5,892	5	42,424	9,257	5	116,5	0,404
Интенсивность фагоцитоза, отн.ед. флуоресценции	7+1	52,7	6,717	5	47,875	3,666	4	90,8	0,121
	14+1	379,4	48,799	5	417	104,317	5	109,9	0,243
	14+7	138,4	13,649	5	134,8	10,085	5	97,4	0,324
	14+14	202,2	30,161	5	208,8	19,728	5	103,3	0,346
	14+22	237,6	19,565	5	232,6	12,621	5	97,9	0,322

Заклучение

Обобщая результаты проведенной работы, следует отметить, что электромагнитное излучение мобильных телефонов диапазона 900 МГц при хроническом воздействии оказывает влияние на функциональные показатели фагоцитарной системы крыс, в том числе повышает уровень базальной продукции АФА и АФК перитонеальными макрофагами в период после отмены действия фактора. При этом консервативные функции макрофагов, такие как фагоцитоз и функциональный ответ, сохраняются в пределах нормы. Эффекты более выражены у крыс, которые подвергались действию ЭМИ в период полового созревания по сравнению со взрослыми животными.

Результаты нашего эксперимента на целостном организме хорошо согласуются с опубликованными ранее данными [16, 23]. Выявленные нами изменения являются преходящими, и показатели восстанавливаются в течение месяца после отмены действия фактора. Это может являться свидетельством того, что описанные эффекты развиваются, опосредовано, как реакция различных систем организма. Учитывая динамику изменений, можно предположить вовлечение центральной кроветворной системы и важную роль стресс-адаптационного синдрома при формировании спектра изменений в функциональном состоянии макрофагов. Так, независимыми научными группами были установлены реакции на воздействие ЭМИ сотовых телефонов со стороны иммунной, нервной, сосудистой и эндокринной систем. Существование таких биологических эффектов, как протекание капилляров, нарушение гематоэнцефалического барьера и нейрогуморальные реакции организма во время или после воздействия излучений сотовых телефонов на целостный организм были признаны Еврокомиссией [1]. Однако связь этих биологических эффектов с увеличением рисков для здоровья до сих пор остается неподтвержденной из-за неполного понимания механизмов развития генотоксических эффектов воздействия ЭМИ.

В нашей работе впервые описаны изменения окислительного метаболизма тканевых макрофагов после воздействия излучений сотовых телефонов на целостный организм, которые соответствуют изменениям, регистрируемым при хроническом воспалительном процессе, и имеют важное биологическое значение в ключе понимания и изучения механизмов патогенеза ряда заболеваний, а также генотоксических и тератогенных эффектов. Аналогичные реакции тканевых макрофагов были ранее охарактеризованы английскими учеными как один из механизмов формирования опосредованных эффектов воздействия ионизирующих излучений на организм [13, 24]. Таким образом, мы предполагаем, что увеличение базального уровня продукции свободных радикалов резидентными тканевыми макрофагами является одним из важнейших механизмов развития эффектов воз-

действия как ионизирующих, так и неионизирующих электромагнитных излучений.

Полученные результаты хорошо согласуются с известными фактами и дополняют современные представления о механизмах формирования эффектов неионизирующих излучений. Разработанная методология исследования может быть использована при оценке возможных рисков изучаемого фактора для здоровья человека.

Работа выполнена в рамках исследований по теме “Влияние электромагнитных излучений на важнейшие системы организма и определение подходов к снижению выявленных нарушений” ГПО-ФИ Беларуси 2006 – 2010 гг. Установка для облучения разработана и изготовлена к.т.н. В.И. Шалатониным, к.т.н. В.Н. Мищенко, сотрудниками НИЛ “Воздействие информационно-волновых полей на биологические системы и объекты”, ГУО “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники” (г. Минск).

ЛИТЕРАТУРА

1. Possible effects of electromagnetic fields (EMF) on human health-opinion of the scientific committee on emerging and newly identified health risks (SCENIHR) / A. Ahlbom [et al.] // *Toxicology*. – 2008. – 246(2-3).
2. Long-term use of cellular phones and brain tumours: increased risk associated with use for > or =10 years / L. Hardell [et al.] // *Occup Environ Med*. – 2007. – 64(9).
3. **Hardell, L.** Case-control study of the association between the use of cellular and cordless telephones and malignant brain tumors diagnosed during 2000 – 2003 / L. Hardell, M. Carlberg, K.H. Mild // *Environ Res*. – 2006. – 100(2).
4. **Otto, M.** Electromagnetic fields (EMF): do they play a role in children’s environmental health (CEH)? / M. Otto, K.E. Muhlendahl // *Int J Hyg Environ Health*. – 2007. – 210(5).
5. **Johansen, C.** Electromagnetic fields and health effects-epidemiologic studies of cancer, diseases of the central nervous system and arrhythmia-related heart disease / C. Johansen // *Scand J Work Environ Health*. – 2004. – 30 Suppl 1.
6. Cancer is a Preventable Disease that Requires Major Lifestyle Changes / P. Anand [et al.] // *Pharm Res*. – 2008. – 25(9)
7. Inflammation and tumor microenvironments: defining the migratory itinerary of mesenchymal stem cells / E. Spaeth [et al.] // *Gene Ther*. – 2008. – 15(10).
8. **Mantovani, A.** Macrophages, innate immunity and cancer: balance, tolerance, and diversity / A. Mantovani, A. Sica // *Curr Opin Immunol*. – 2010.
9. Cancer and Inflammation: Promise for Biologic Therapy / S. Demaria [et al.] // *J Immunother*. – 2010.
10. **Mikkelsen R.B.** Biological chemistry of reactive oxygen and nitrogen and radiation-induced signal transduction mechanisms / R.B. Mikkelsen, P. Wardman // *Oncogene*. – 2003. – 22(37).
11. Корреляция между внутриклеточным содержанием оксида азота и частотой мутантных лимфоцитов после радиационного воздействия в малых дозах / И.А. Замулаева [и др.] // *Радиационная биология. Радиоэкология*. – 2007. – № 47(1). – С. 86-92.

12. Microwaves from UMTS/GSM mobile phones induce long-lasting inhibition of 53BP1/ gamma-H2AX DNA repair foci in human lymphocytes / I.Y. Belyaev [et al.] // *Bioelectromagnetics*. – 2009. – 30(2).
13. Ongoing activation of p53 pathway responses is a long-term consequence of radiation exposure in vivo and associates with altered macrophage activities / P.J. Coates [et al.] // *J Pathol*. – 2008. – 214(5).
14. Аутоиммунные процессы после пролонгированного воздействия электромагнитных полей малой интенсивности (результаты эксперимента) / Ю.Г. Григорьев [и др.] // *Радиационная биология. Радиозкология*. – 2010. – № 50(1). – С. 5-35.
15. Radio frequency electromagnetic radiation (RF-EMR) from GSM (0.9/1.8GHz) mobile phones induces oxidative stress and reduces sperm motility in rats / M. Mailankot [et al.] // *Clinics (Sao Paulo)*. – 2009. – 64(6).
16. Ginkgo biloba prevents mobile phone-induced oxidative stress in rat brain / A. Ilhan [et al.] // *Clin Chim Acta*. – 2004. – 340(1-2).
17. Inflammatory-type responses after exposure to ionizing radiation in vivo: a mechanism for radiation-induced bystander effects? / S.A. Lorimore [et al.] // *Oncogene*. – 2001. – 20(48).
18. **Петрнев, Д.Р.** Окислительный метаболизм перитонеальных макрофагов в отдаленные сроки после воздействия ионизирующего излучения *In vivo* / Д.Р. Петрнев, Д.А. Господарев // *Молодежь в науке*. – 2007: прил. к журн. «Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі». В 4 ч. Ч. 1. Серия биологических наук; серия медицинских наук / редкол. Серии биол. наук: И.Д. Вологовский (гл. ред.), А.Г. Лобанок [и др.], редкол. Серии мед. наук: Е.Ф. Конопля (гл. ред.), А.Г. Мрочек [и др.]. – Минск: Белорус. наука, 2008. – С. 401-406.
19. Taxifolin ameliorates cerebral ischemia-reperfusion injury in rats through its anti-oxidative effect and modulation of NF-kappa B activation / Y.H. Wang [et al.] // *J Biomed Sci*. – 2006. – 13(1).
20. **Safronova, V.G.** Immunomodulating action of low intensity millimeter waves on primed neutrophils / V.G. Safronova, A.G. Gabdoulkhakova, B.F. Santalov // *Bioelectromagnetics*. – 2002. – 23(8).
21. Improved methods to measure end products of nitric oxide in biological fluids: nitrite, nitrate, and S-nitrosothiols / M. Marzinzig [et al.] // *Nitric Oxide*. – 1997. – 1(2).
22. **Петрнев, Д.Р.** Функциональные показатели перитонеальных макрофагов крыс при действии электромагнитного излучения диапазона мобильной связи 900мГц. Электромагнитные излучения в биологии / Д.Р. Петрнев: труды IV Международной конференции. Калуга, 21-23 октября 2008 / КГПУ им. К.Э. Циолковского; редкол.: Г.В. Чернова (отв. ред.), О.П. Эндебера [и др.]. – Калуга, 2008. – С. 228-234.
23. ROS release and Hsp70 expression after exposure to 1,800 MHz radiofrequency electromagnetic fields in primary human monocytes and lymphocytes / M. Lantow [et al.] // *Radiat Environ Biophys*. – 2006. – 45(1).
24. Indirect macrophage responses to ionizing radiation: implications for genotype-dependent bystander signaling / P.J. Coates [et al.] // *Cancer Res*. – 2008. – 68(2).

УДК 543.57

Ю.В. МАТВЕЙЧУК, С.М. ВИШНЕВСКАЯ, Л.П. МАКСЕ,
В.В. ЯСИНЕЦКИЙ, А.В. ТОМОВ

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЛИЗА ГИДРОКСОСОЕДИНЕНИЙ ЦИНКА МЕТОДАМИ ТГ, ДТА, ДСК

Термолиз гидроксокарбоната, аморфного и кристаллического гидроксидов цинка исследован методами ТГ, ДТА, ДСК в сочетании с ИК-Фурье-спектроскопией. Определены минимальные температуры разложения, величины тепловых эффектов и последовательность химических превращений.

Введение

Оксид цинка находит применение в качестве катализатора, в керамике, косметической, шинной, лакокрасочной промышленности, электронике, оптике и др. Одним из основных способов получения оксида цинка является термолиз его оксалата, карбоната и гидроксокарбоната, что обуславливает интерес к условиям их термического разложения [1-3]. При выборе варианта регенерации цинка из отходов промышленных производств в качестве исходного соединения для получения оксида цинка может быть его гидроксокарбонат [4]. В то же время в литературе практически отсутствуют данные по термическому анализу аморфного и кристаллического гидроксидов цинка.

Опубликованные данные по температурам разложения гидроксо соединений неоднозначны [5-8], а для аморфного гидроксидов цинка практически отсутствуют. В [5] сказано, что аморфный гидроксид цинка превращается в оксид при температуре красного каления. Для практики важно определение минимальных температур разложения гидроксо соединений, поскольку в ряде предлагаемых способов оксид цинка получают из гидроксосульфата при температурах 900–950°C. С целью снижения температуры обжига осадок гидроксосульфата обрабатывают раствором карбоната или гидрокарбоната аммония с получением гидроксокарбоната цинка, что позволяет снизить температуру обжига до 750°C [8]. Кроме того, практически отсутствуют данные о величинах тепловых эффектов при разложении аморфного и кристаллического гидроксидов. Известно только, что теплота реакции разложения гидроксокарбоната цинка $ZnCO_3 \cdot nZn(OH)_2$ составляет 127,9 кДж/моль [9].

Целью настоящей работы было определение минимальных температур разложения, величин тепловых эффектов и описание кривых ТГ, ДТА, ДСК термического разложения гидроксо соединений цинка.

Методики эксперимента

Гидроксокарбонат, кристаллический и аморфный гидроксиды цинка синтезировали по методикам, приведенным в [5]. Синтезировали и исследовали по пять образцов каждого из трех соединений.

Синхронный термогравиметрический (ТГ) и дифференциально-термический анализ (ДТА) исследуемых соединений проводили в динамическом режиме на дериватографе NETZSCH STA 409 EP. Диапазон измерений составил 20–1000°C. Условия анализов: скорость нагрева – 5°C/мин, масса навески – 40–80 мг, термопара – Pt10%Rh–Pt, атмосфера – воздух, материал тиглей – алунд. На рисунках 1, 4, 5 представлены кривые ТГ и ДТА для одного из пяти образцов каждого из исследуемых соединений, поскольку для всех пяти образцов как гидроксокарбоната, так и аморфного и кристаллического гидроксидов цинка получены сходимые и воспроизводимые результаты.

Величины тепловых эффектов определяли методами ДТА и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК).

Определение величин тепловых эффектов методом ДТА проводили по методике [10]. Площадь пиков рассчитывали с помощью прикладной программы NETZSCH Proteus–Thermal Analysis–Version 4.8.1.

Определение величин тепловых эффектов методом ДСК проводили на калориметре METTLER STAR^c SW 9.01. Образцы массой 7–11 мг нагревали на воздухе с постоянной скоростью 5°C/мин. Диапазон измерений составил 30–500°C (предельная температура измерений калориметра – 500°C). На рисунке 3 представлены кривые ДСК в диапазоне температур от 30 до 300°C, поскольку при температуре более 300°C не наблюдается тепловых эффектов и кривые параллельны оси температур.

Проводилась статистическая обработка результатов измерений тепловых эффектов методами ДТА и ДСК с использованием критерия Стьюдента.

ИК-спектры исходных соединений, промежуточных и конечных продуктов их термолитического разложения регистрировались на Фурье-спектрометре ИнфРАЛЮМ ФТ-02 в диапазоне волновых чисел 2000–400 см⁻¹ и обрабатывались с помощью прикладной программы СпектраЛЮМ (SpectraLUM). Для записи ИК-спектров использовалась методика, описанная в [11].

Размер частиц оксида цинка (средний диаметр) определяли на лазерном дифрактометре LS – 100 Q методом динамического светорассеяния в потоке дистиллированной воды (показатель преломления воды $n=1,333$). Для предотвращения агрегации частиц использовали ультразвук. Источник света – лазер с длиной волны 780 нм. Воспроизводимость результатов измерений более 99%.

Результаты и их обсуждение

Из рисунка 1 (кривая 1) видно, что уменьшение массы гидроксокарбоната цинка в интервале температур 50–200°C связано с частичным дегидроксилированием и практически полным удалением координационной воды, при этом потеря массы составляет около 5,5 (до 6,5%). В ИК-спектре исходного соединения не зарегистрировано полос, характерных для кристаллизационной воды; в интервале 1000–700 см⁻¹ обнаружены полосы, характерные для координационной воды и ОН-групп

(рис. 2, а) [7, 12]. В ИК-спектре гидрокарбоната цинка, выдержанного до постоянной массы при 180°C (рис. 2, б), исчезают полосы 735 , 884 , 907см^{-1} и становятся менее интенсивными полосы 745 , 955см^{-1} .

В интервале температур 200 – 250°C происходит разложение карбонатной (декарбонизация) и оставшейся гидроксидной составляющей (потеря массы 19 – 20%), завершающееся при температурах 300 – 560°C . В интервале температур от 250 до 300 – 560°C потеря массы составляет около $1,5\%$ (до $3,5\%$) (рис. 1, кривая 1). Общая потеря массы гидрокарбоната цинка составляет 27 – 29% .

После прокаливания гидрокарбоната при 300°C в его ИК-спектре (рис. 2, в) обнаружены слабые полосы 710 и 838см^{-1} , характерные как для координированной воды и ОН-групп [7, 12], так и согласно [1, 13] для CO_3 -групп.

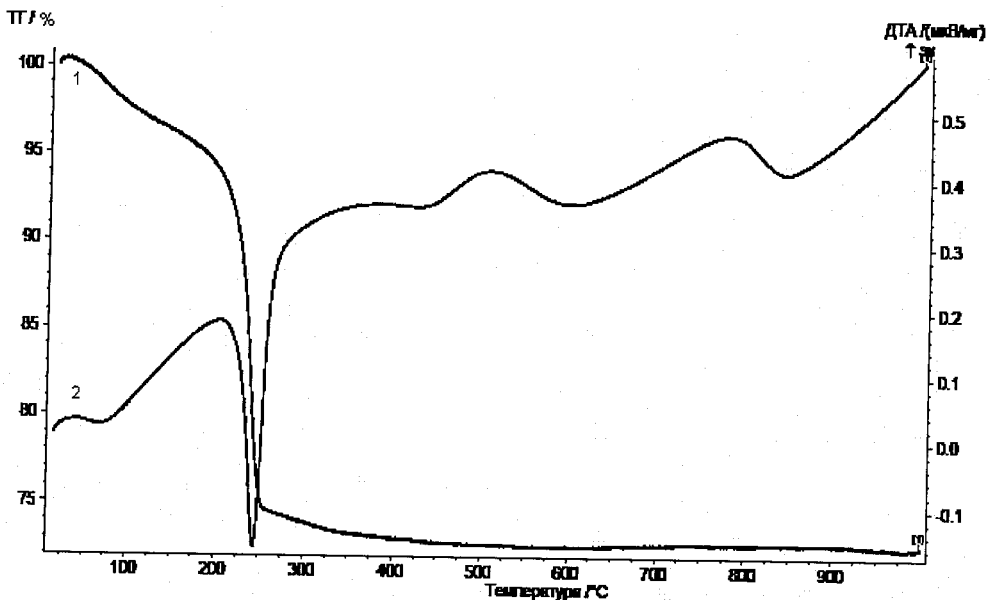


Рис. 1. Кривые ТГ (1) и ДТА (2) гидрокарбоната цинка

Разложение гидрокарбоната цинка сопровождается эндотермическими эффектами (рис. 1, кривая 2) с пиками при $67 \pm 1^{\circ}\text{C}$ (очень слабый эффект) и $245 \pm 2^{\circ}\text{C}$ и экзотермическими эффектами с пиками при $505 \pm 5^{\circ}\text{C}$ и $780 \pm 10^{\circ}\text{C}$. На кривой ДСК (рис. 3, а) разложение гидрокарбоната цинка представляет собой одностадийный процесс и сопровождается эндоэффектом с пиком при $246 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Полученные результаты согласуются с данными [1], где интенсивное разложение гидрокарбоната состава $\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$ происходит при температуре более 200°C и завершается при 350°C . Общая потеря массы составила $25,88\%$. В [2] процесс термоллиза гидрокарбоната цинка представлен следующим образом: при 22 – 177°C происходит про-

цесс дегидратации (потеря массы 1,6%), при 177–245°C – дегидроксилирования и декарбонизации (22,5%), при 245–367 и 245–546°C – декарбонизации (1,7%).

Термолиз аморфного гидроксида цинка (рис. 4, кривая 1) протекает ступенчато при температурах 40–130°C, 130–180°C, 180–300°C. В интервале температур 300–700°C разложение вещества замедляется (потеря массы около 3–3,5%). Общая потеря массы составляет 30,5–32,5%. В ИК-спектре исходного аморфного гидроксида обнаружена слабая полоса 1645см⁻¹, характерная для кристаллизационной воды [7, 12] (рис. 2, г). В спектрах аморфного гидроксида, прокаленного при температуре 300°C, обнаружена широкая полоса 1700–1300см⁻¹, которая указывает на присутствие остаточных количеств гидроксида (рис. 2, д).

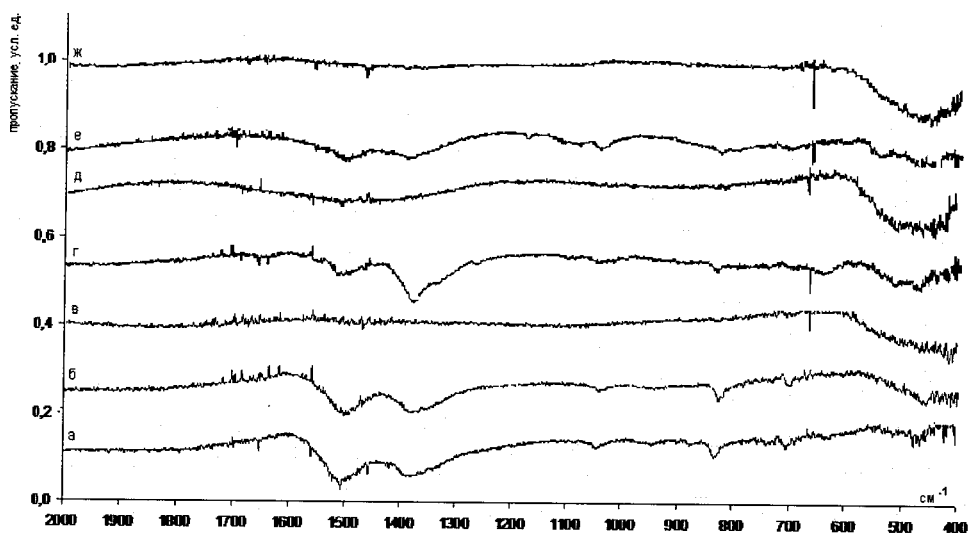


Рис. 2. ИК-спектры: а, г, е – исходных гидрокарбоната, аморфного и кристаллического гидроксидов цинка соответственно; б – продукта термолиза гидрокарбоната цинка при 180°C; в, д, ж – продуктов термолиза гидрокарбоната, аморфного и кристаллического гидроксидов цинка, соответственно, при 300°C

Термолиз аморфного гидроксида цинка сопровождается эндотермическими эффектами (рис. 4, кривая 2) с пиками при температурах 76±1°C, 153±1,5°C, 224±1,5°C, 256±5°C. Зафиксирован экзотермический эффект с пиком при 820±12°C. Из кривой ДСК (рис. 3, б) видно, что разложение аморфного гидроксида цинка сопровождается эндоэффектами с пиками при температурах 154±1°C, 228±1°C, 259±1°C.

Разложение кристаллического гидроксида цинка (рис. 5, кривая 1) протекает ступенчато при температурах 50–135°C, 135–160°C, 160–250°C. При температуре 250°C потеря массы составляет 19–20%, а в диапазоне от 250°C до 400–480°C – около 1,5%. Общая потеря массы составляет 20,5–21,5%. При температурах 160–200°C наблюдалось замедление процесса разложения. В ИК-спектрах исходного гидроксида не обнаружено

полос, характерных для кристаллизационной воды (рис. 2, е). В ИК-спектрах кристаллического гидроксида цинка, прокаленного при 300°C , исчезают полосы, характерные для гидроксида цинка (рис. 2, ж).

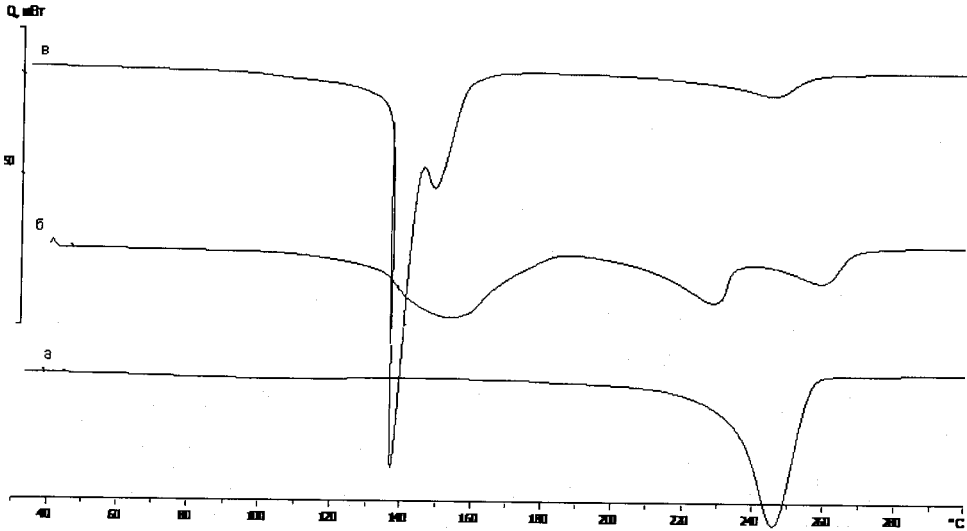


Рис. 3. Кривые ДСК: а – гидрокарбоната цинка, б – аморфного гидроксида цинка, в – кристаллического гидроксида цинка

Термолиз кристаллического гидроксида цинка сопровождается эндотермическими эффектами (рис. 5, кривая 2) с пиками при температурах $137\pm 2^{\circ}\text{C}$, $145\pm 2^{\circ}\text{C}$, $237\pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Экзотермические эффекты отсутствуют. На отсутствие кристаллизационной воды указывает то, что до 125°C на кривой ДТА отсутствуют тепловые эффекты. Из кривой ДСК (рис. 3, в) видно, что разложение кристаллического гидроксида цинка протекает в три стадии и сопровождается эндоэффектами с пиками при $137\pm 1^{\circ}\text{C}$, $149\pm 1^{\circ}\text{C}$, $242\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Однако согласно [7] процесс разложения свежеосажденного гидроксида цинка (ϵ -модификация) протекает в одну стадию и сопровождается эндотермическим эффектом с пиком при 228°C .

Величины тепловых эффектов, определенные методами ДТА и ДСК, приведены в таблице.

Вещество	Величина теплового эффекта, кДж/кг (ДСК)	Величина теплового эффекта, кДж/кг (ДТА)
Гидрокарбонат цинка	441 ± 4	535 ± 21
Крист. $\text{Zn}(\text{OH})_2$	436 ± 4	446 ± 18
Аморфный $\text{Zn}(\text{OH})_2$	411 ± 4	421 ± 34

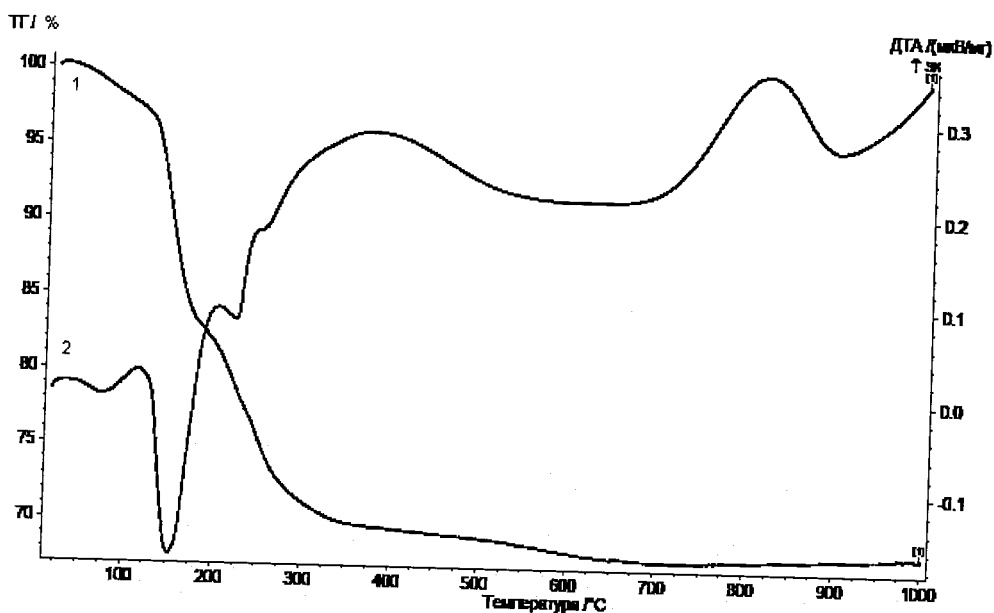


Рис. 4. Кривые ТГ (1) и ДТА (2) аморфного гидроксида цинка

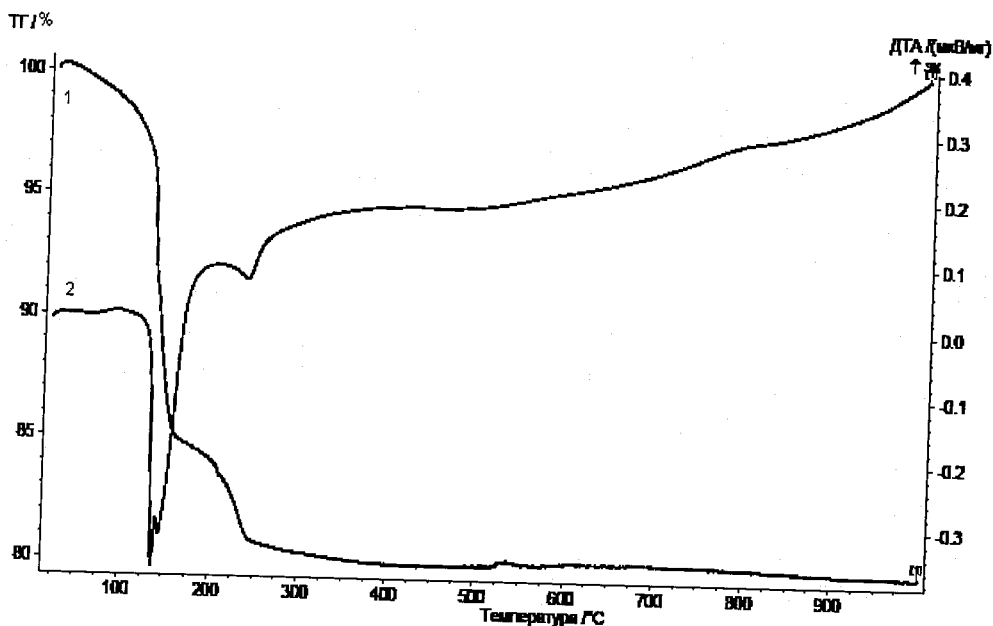


Рис. 5. Кривые ТГ (1) и ДТА (2) кристаллического гидроксида цинка

Наличие на кривых ДТА гидроксокарбоната, аморфного гидроксида цинка экзоэффектов может быть связано с переходом оксида цинка из аморфного в кристаллическое состояние либо с укрупнением (спеканием) частиц [14]. Результаты исследования распределения частиц ок-

сида цинка по размерам показали, что при увеличении температуры обжига их размер уменьшается, поэтому объяснить появление экзоэффектов спеканием нельзя.

Заклучение

Гидрокарбонат и кристаллический гидроксид цинка предпочтительны для получения оксида цинка из-за относительно низких температур разложения (300, 400°C соответственно). Полученные температуры разложения существенно ниже, чем в способе [8].

Полученные методами ДТА и ДСК тепловые эффекты реакций разложения гидрокарбоната, в особенности кристаллического и аморфного гидроксидов цинка, достаточно хорошо коррелируют между собой. Описаны кривые ТГ, ДТА, ДСК разложения гидроксидов цинка и установлено, что разложение гидроксидов цинка представляет собой многостадийный процесс; зафиксированы эндо- и экзотермические эффекты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thermal decomposition of zinc carbonate hydroxide / N. Kanari [et al.] // *Thermochimica Acta* (410). – 2004. – P. 93-100.
2. Dynamic and Controlled Rate Thermal analysis of hydrozincite and smithsonite / Ray L. Frost [et al.] // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2008. – V. 92. – № 3. – P. 911-916.
3. Особенности термолитиза гидратов гидрокарбонатов никеля (II), меди (II), цинка (II) / С.В. Добрыднєв [и др.] // *Химия и химическая технология*. – 2009. – Том 52. – Вып. 6. – С. 25-28.
4. **Матвейчук, Ю.В.** Технологические аспекты переработки цинксодеждающих отходов промышленных производств / Ю.В. Матвейчук // *Экология России и сопредельных территорий: материалы XIV Международной экологической студенческой конференции* / Новосибирский гос. ун-т, Новосибирск, 2009 г. – С. 156-157.
5. **Карякин, Ю.В.** Чистые химические вещества / Ю.В. Карякин, И.И. Ангелов. – М.: Химия, 1974. – 408 с.
6. Справочник химика: в 6т. / редкол.: Б.Н. Никольский (гл. ред.) [и др.]. – Л.: Химия, 1962 – 1967. – Т. 2. – 1168 с.
7. **Чалый, В.П.** Гидроокиси металлов (закономерности образования, состав, структура и свойства) / В.П. Чалый. – Киев: Наукова думка, 1972. – 158 с.
8. **Воропанова, Л.А.** Разработка рационального способа обезвоживания осадка, полученного химической конденсацией цинка / Л.А. Воропанова, Л.Г. Баратов. // *Вестник Владикавказского научного центра*. – 2009. – Том 9. – № 3. – С. 59-63.
9. Investigation of the effect of intensive ball milling in a planetary ball mill on the thermal decomposition of cadmium carbonate and basic zinc carbonate / K. Książek [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series. XIII International Seminar on Physics and Chemistry of Solids* (79). – 2007. – P. 1-6.
10. **Уэндландт, У.** Термические методы анализа / У. Уэндландт. – М.: Мир, 1978. – 527 с.

11. Способ проведения инфракрасной спектроскопии твердофазных и/или жидких и/или вязких и/или газообразных веществ: пат. ВУ (11) 11876 (13) С1 / Л.П. Максе; А.В. Томов; П.И. Марков; заявитель Могилевский государственный университет им. А.А. Кудешова. – № а20071435; заявл. 2007.11.26; опубл. 2009.04.30 // Афіцыйны бюлетэнь. – 2009. – № 2 (67). – С. 111.
12. **Полторак, О.М.** Физико-химические основы неорганической химии / О.М. Полторак, Л.М. Ковба. – М.: МГУ, 1984. – 288 с.
13. Infrared and infrared emission spectroscopy of the zinc carbonate mineral smithsonite / Ray L. Frost [et al.] // Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy – 2008. – 70 (5). – P. 1120-1126.
14. Масс-спектрометрический и термический анализ солевых систем $Zn_2(OH)_2CO_3 \cdot xH_2O - NaCl$ / П.С. Соколов [и др.] // Журнал неорганической химии. – 2007. – Том 52. – № 12. – С. 2080-2084.

Поступила в редакцию 25.02.2010 г.

УДК 546.56+546.74+546.73+546.81:631.41

**А.В. ХАДАНОВИЧ, В.Г. СВИРИДЕНКО,
Н.И. ДРОЗДОВА**

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ СВИНЦА И КАДМИЯ В СИСТЕМЕ ПОЧВА – РАСТЕНИЕ В УСЛОВИЯХ ГОМЕЛЬСКОГО РЕГИОНА

В настоящей работе определено содержание ионов свинца и кадмия в почвах и растениях естественного фитоценоза для различных придорожных участков. Установлен фоновый уровень содержания тяжелых металлов в вегетативных частях растений представителей пяти семейств, произрастающих на расстоянии 100 метров от автомобильных трасс. На большом фактическом материале установлена корреляция распределения тяжелых металлов в почвах и растениях в исследуемых районах. Единственным объективным показателем наличия в почве соответствующего участка доступного количества для растений тяжелых металлов является только конкретный вид растений, по накоплению в фитомассе того или иного элемента можно судить об экологически значимом содержании его в почве.

Введение

Почвы и растения вблизи автодорог могут характеризоваться повышенным содержанием тяжелых металлов вследствие загрязнения их газопылевыми выбросами автотранспорта [1–3]. Тяжелые металлы, поступающие из различных источников, попадают в конечном счете на поверхность почвы. И их дальнейшая судьба зависит от ее физических и химических свойств [4, 5]. Продолжительность пребывания загрязняющих компонентов, особенно ионов тяжелых металлов, в почвах гораздо долъ-

ше, чем в других частях биосферы. Ионы тяжелых металлов обладают различной подвижностью в почвах по горизонтали и по вертикали, поэтому распределение их по глубине почвенного профиля неоднородно [6, 7]. Их содержание на различном удалении от автотранспортных магистралей изменяется.

Целью настоящей работы являлось проведение аналитических исследований почв и растений на содержание ионов кадмия и свинца вдоль автомагистралей с различным по интенсивности движением.

Объектом исследований служили образцы дерново-подзолистой слабооподзоленной почвы на видоизмененных связных песках, подстилаемых моренными супесями, отобранные вдоль автомагистралей из горизонта А1 на расстоянии 8, 32 и 100 м на пробных площадях всех ключевых участков в исследуемых элементарных ландшафтах. Экспериментальные участки предварительно закладывались на 15 площадях размером 25 м² с разной техногенной нагрузкой (величина грузопотока, авт./ч составила 1360; 570; 1510 для автомагистралей Гомель – Калинковичи, Гомель – Ветка, Гомель – Чернигов соответственно). С каждой площадки отбирали одну объединенную пробу, состоящую из 20 точечных заборов. Глубина отбора составляла 15 – 20 см, а масса объединенной пробы – около 500 г. Каждая средняя проба помещалась в маркированные пакеты [8]. В образцах почв определяли основные агрохимические показатели, количество валовых и подвижных форм тяжелых металлов.

Растительные образцы отбирались в мае – июле с 8 до 10 часов утра в сухую погоду дважды в месяц с одновременным забором почвы. Наиболее часто встречающиеся в исследуемых зонах растения принадлежали к пяти семействам: сем. Розоцветные – Rosaceae, сем. Мятликовые – Poaceae, сем. Бобовые – Fabaceae, сем. Подорожниковые – Plantaginaceae, сем. Сложноцветные (астровые) – Compositae (Asteraceae). Соотношение видов на пробных площадках было постоянным на протяжении эксперимента. Определяли содержание тяжелых металлов в наземной фитомассе и корневой системе травянистых растений. Растительный образец массой 5 г озоляли в муфельной печи при температуре красного каления (550 – 600°C). Озоленный остаток обрабатывали на песчаной бане 2 мл азотной и 3 мл соляной концентрированными кислотами, выпаривали до исчезновения оксидов азота, сухой остаток растворяли в 0,1 М растворе соляной кислоты.

Содержание ионов тяжелых металлов в почвах и растениях определяли вольтамперометрическим методом, с помощью которого принципиально возможно количественно определять любые соединения, способные электроокисляться или электровосстанавливаться, косвенными приемами исследовать также электрохимически неактивные вещества. Определение исследуемых элементов проводили из одной пробы на аммонийно-нитратном фоне при различных значениях рН: свинец – при

pH 1; кадмий – при pH 5,2. Получали четкие пики полярограмм с потенциалами: свинец – -0,8 В; кадмий – -0,6 В относительно донной ртути [8].

Результаты и обсуждение

Агрохимические показатели исследуемых почв характеризовались следующими величинами: значение pH исследуемых почв колебалось от 5,50 до 5,83 единиц, содержание гумуса в среднем составляло 1,63%, содержание подвижных фосфатов – 8,20 мг/100 г почвы).

В таблице 1 приведено содержание тяжелых металлов в исследуемых почвах, отобранных на расстоянии 100 метров от автомагистралей.

Таблица 1
Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в почвах

Автомагистраль	Свинец		Кадмий	
	1	2	1	2
Гомель-Ветка	16,8	2,2	0,4	0,2
Гомель-Калинковичи	18,6	1,8	0,5	0,4
Гомель-Чернигов	19,8	3,5	0,6	0,5
ОДК [9, 10]	32,0	6,0	0,5	0,3

Примечание

- 1 – содержание валовых форм;
2 – содержание подвижных форм.

Наименьшим содержанием металлов-загрязнителей характеризовались почвы вдоль трассы Гомель – Ветка, где концентрация всех исследуемых элементов в среднем составляла: свинца – 2,2 мг/кг, кадмия – 0,2 мг/кг. Полученные результаты различия содержания подвижных форм свинца вдоль трассы Гомель – Ветка и трассы Гомель – Калинковичи свидетельствуют не только о связи загрязнения тяжелым металлом почв с грузопотоком автотранспорта, но и с возможным вкладом аэрозольных поступлений городского Северного промышленного комплекса. Наибольшее содержание подвижных форм фиксировалось в образцах почв, отобранных вдоль трассы Гомель–Чернигов. Содержание исследуемых катионов составляло: свинца – 3,5 мг/кг, кадмия – 0,5 мг/кг. Проведенный анализ валовых и подвижных форм в почвах придорожной экосистемы показал, что на расстоянии 100 м значения содержаний тяжелых металлов в почвах практически не превышали величин ОДК. Данные показатели приняты за фоновые. В таблице 2 приведены результаты исследований по содержанию подвижных форм в почвах придорожных экосистем.

Таблица 2

**Содержание подвижных форм ионов тяжелых металлов (мг/кг)
в почвах придорожных экосистем**

Автомагистраль	Свинец		Кадмий	
	1	2	1	2
Гомель-Ветка	8,96	8,08	0,56	0,34
Гомель-Калинковичи	4,96	5,40	0,92	0,63
Гомель-Чернигов	15,16	12,24	1,02	0,59
ОДК [9, 10]	6,0		0,3	

Примечание. Расстояние:

1 – 8 м от автомагистрали;

2 – 32 м от автомагистрали.

ОДК – ориентировочно допустимые концентрации.

Полученные данные свидетельствуют об отсутствии четких закономерностей изменения содержания ионов тяжелых металлов в почвах от расстояния до трассы, что, по всей вероятности, связано с другими источниками загрязнения.

Результаты исследований по содержанию ионов тяжелых металлов в наземных частях различных видов растений, отобранных на расстоянии 100 м от автомагистралей, показали, что доступность исследуемых элементов для растений зависит от их биологической принадлежности. Один и тот же вид растений в разных экологических условиях накапливает разные количества тяжелых металлов. Анализ данных по содержанию ионов кадмия в изученных видах растений, отобранных в разных условиях, показал, что в отдельных семействах превышение максимального содержания над минимальным до 4 раз характерно для семейства Сложноцветных, что позволяет отнести их к качественно информативным биообъектам. Они могут быть использованы в качестве концентраторов данных элементов в системе эколого-биогеохимического мониторинга окружающей среды.

Изучая зависимость содержания тяжелых металлов в растениях от содержания данного элемента в почве, был вычислен коэффициент накопления – отношение содержания элемента в наземной части растений к его содержанию в почве, позволяющий косвенно судить о степени доступности элемента в почве для растений и о поведении его в системе *почва – растение*. В таблице 3 представлены значения коэффициентов накопления тяжелых металлов в наземной части дикорастущих растений.

Таблица 3

Значения коэффициентов накопления ионов кадмия и свинца

Вид растений	Кадмий			Свинец		
	1	2	3	1	2	3
сем. Мятликовые						
Кострец безостый	0,65	0,38	0,24	0,96	1,18	0,75
Ежа сборная	0,45	0,25	0,24	1,27	1,51	0,88

Окончание табл. 3

Вид растений	Кадмий			Свинец		
	1	2	3	1	2	3
сем. Розоцветные						
Лапчатка серебристая	1,05	0,48	0,44	1,12	1,28	0,73
Лапчатка гусиная	1,15	0,53	0,52	1,05	1,29	0,77
сем. Бобовые						
Клевер ползучий	1,5	0,63	0,64	1,41	1,78	0,99
Мышиный горошек	1,5	0,55	0,56	1,39	1,72	0,93
сем. Подорожниковые						
Подорожник большой	0,8	0,35	0,32	1,46	1,73	1,04
Подорожник ланцетолистный	0,65	0,28	0,2	1,51	1,73	0,96
сем. Сложноцветные						
Ромашка непахучая	0,10	0,08	0,04	0,47	0,54	0,29
Тысячелистник обыкновенный	0,40	0,01	0,12	0,55	0,66	0,38

Примечание. Автомагистраль:

1 – Гомель– Ветка;

2 – Гомель– Калинковичи;

3 – Гомель– Чернигов.

Распределение ионов кадмия в растениях, принадлежащих различным семействам, неравномерное. Значения содержания элемента варьировали от 0,02 (сем. Сложноцветные) до 0,34 мг/кг (сем. Бобовые) на пробных площадках; содержание ионов свинца варьировало от 1,02 (сем. Сложноцветные) до 3,65 мг/кг (сем. Подорожниковые).

По результатам анализа составлены ряды накопления тяжелых металлов вегетативными частями растений: для ионов кадмия – сем. Сложноцветные < сем. Мятликовые < сем. Подорожниковые < сем. Розоцветные < сем. Бобовые; для ионов свинца – сем. Сложноцветные < сем. Розоцветные < сем. Мятликовые < сем. Бобовые < сем. Подорожниковые.

В таблице 4 приведены рассчитанные коэффициенты накопления элементов в системе почва – корень.

Таблица 4
Содержание ионов кадмия и свинца в корнях растений (мг/кг)
и значения коэффициентов накопления элементов

Вид растений	Кадмий			Свинец		
	1	2	3	1	2	3
сем. Мятликовые						
Кострец безостый	0,28	0,37	0,34	5,32	5,31	5,28
Ежа сборная	0,27	0,32	0,26	6,44	6,62	6,56
<i>среднее · значение</i>	<u>0,27</u>	<u>0,34</u>	<u>0,30</u>	<u>5,88</u>	<u>5,97</u>	<u>5,92</u>
<i>коэффициент · накопления</i>	1,4	0,9	0,6	2,9	3,3	1,7
сем. Розоцветные						
Лапчатка серебристая	0,21	0,24	0,28	4,92	5,12	5,42
Лапчатка гусиная	0,33	0,36	0,31	5,26	6,30	6,28
<i>среднее · значение</i>	<u>0,27</u>	<u>0,30</u>	<u>0,30</u>	<u>5,09</u>	<u>5,71</u>	<u>5,85</u>
<i>коэффициент · накопления</i>	1,4	0,8	0,6	2,3	3,2	1,7

Окончание табл. 4

Вид растений	Кадмий			Свинец		
	1	2	3	1	2	3
сем. Бобовые						
Клевер ползучий	0,24	0,21	0,32	2,42	2,12	3,42
Мышиный горошек	0,36	0,32	0,38	3,86	2,63	3,62
<i>среднее · значение</i>	<u>0,30</u>	<u>0,27</u>	<u>0,35</u>	<u>3,14</u>	<u>2,38</u>	<u>3,52</u>
<i>коэффициент · накопления</i>	1,5	0,7	0,7	1,4	1,3	1,0
сем. подорожниковые						
Подорожник большой	0,11	0,14	0,12	3,32	3,54	3,68
Подорожник ланцетолистный	0,12	0,10	0,13	4,62	4,12	4,34
<i>среднее · значение</i>	<u>0,11</u>	<u>0,12</u>	<u>0,12</u>	<u>3,97</u>	<u>3,82</u>	<u>4,01</u>
<i>коэффициент · накопления</i>	0,6	0,3	0,2	1,8	2,1	1,1
сем. Сложноцветные						
Ромашка непахучая	0,16	0,20	0,21	3,10	3,46	3,78
Тысячелистник обыкновенный	0,24	0,32	0,36	4,21	4,24	4,72
<i>среднее · значение</i>	<u>0,20</u>	<u>0,26</u>	<u>0,28</u>	<u>3,66</u>	<u>3,85</u>	<u>4,25</u>
<i>коэффициент · накопления</i>	1,0	0,7	0,6	1,7	2,1	1,2

Примечание. Автомагистрали:

- 1 – Гомель– Ветка;
- 2 – Гомель– Калинковичи;
- 3 – Гомель– Чернигов.

При одинаковых условиях произрастания разные виды растений накапливают тяжелые металлы в корнях неодинаково, что, по-видимому, связано с различным электронным строением свинца и кадмия, различными размерами их радиусов ионов и с особенностями поступления катионов в систему почва – корень.

Для установления закономерностей накопления свинца и кадмия растительностью в зависимости от условий произрастания в придорожных экосистемах было определено содержание указанных элементов в вегетативной части дикорастущих растений и рассчитаны значения коэффициентов накопления (таблица 5).

Таблица 5

**Значения коэффициентов накопления ионов кадмия и свинца
(трасса Гомель–Чернигов)**

Вид растений	Кадмий			Свинец		
	1	2	3	1	2	3
сем. Мятликовые						
Кострец безостый	0,53	0,58	0,24	1,08	1,29	0,75
Ежа сборная	0,25	0,41	0,24	1,06	1,33	0,88
сем. Розоцветные						
Лапчатка серебристая	0,71	0,64	0,44	0,47	0,55	0,73
Лапчатка прямостоячая	0,76	0,80	0,52	0,51	0,60	0,77

Окончание табл. 5

Вид растений	Кадмий			Свинец		
	1	2	3	1	2	3
сем. Бобовые						
Клевер ползучий	0,79	1,29	0,64	1,71	2,16	0,99
Мышиный горошек	1,0	1,40	0,56	1,60	1,72	0,93
сем. Подорожниковые						
Подорожник большой	0,5	0,66	0,32	0,81	1,0	1,04
Подорожник ланцетолистный	0,41	0,42	0,2	0,85	0,99	0,96
сем. Сложноцветные						
Ромашка непахучая	0,22	0,31	0,04	0,41	0,50	0,29
Тысячелистник обыкновенный	0,24	0,32	0,12	0,40	0,47	0,38

Примечание. Расстояние от автомагистрали:

- 1 – 8 м;
- 2 – 32 м;
- 3 – 100 м.

Установлено, что общей зависимости накопления ионов свинца и кадмия в фитомассе растений от расстояния до автомагистрали и содержанием их в почве не прослеживается. Наиболее высокая металлоаккумулирующая способность по кадмию и свинцу среди исследуемых растений отмечена для семейства Бобовых. Представители данных семейств можно рассматривать как концентраторы ионов тяжелых металлов в наземных экосистемах, которые можно использовать в биологическом методе очистки почв.

Исследования показали, что только по данным анализов почвы на наличие ионов тяжелых металлов предсказать степень накопления данных токсикантов в надземной части растения сложно. Растения могут в определенной степени с помощью физиологических барьеров ограничивать передвижение токсичных соединений металлов из корней в надземную часть.

Некоторые представители семейства Бобовых и семейства Розоцветных способны значительно улучшить структуру и физико-химические свойства почвы, что особенно важно при решении вопросов, связанных с применением биологического способа очистки техногенно-загрязненных почв. На основании полученных данных установлена положительная корреляция между содержанием подвижных форм элементов в почве и накоплением их отдельными видами растений.

Особую опасность для окружающих районов вблизи автомагистралей представляют обширные открытые участки почв, лежащие в 8-метровой зоне, с поверхностного слоя которых могут выноситься токсиканты на близлежащие садово-огородные участки и пахотные угодья.

Заклучение

Установлен фоновый уровень содержания тяжелых металлов в вегетативных частях растений представителей пяти семейств, произрастающих на расстоянии 100 м от автомобильных трасс. На большом фактическом материале установлена корреляция распределения тяжелых металлов в почвах и некоторых растениях в исследуемых районах. Показано, что наиболее высокой металлоаккумулирующей способностью среди исследуемых растений обладают представители семейства Розоцветных и семейства Бобовых. Представителей этих семейств следует рассматривать как концентраторов ионов тяжелых металлов и рекомендовать для использования в биологическом методе очистки почв. Единственным объективным показателем наличия в почве соответствующего участка доступного количества для растений тяжелых металлов является только конкретный вид растений. По накоплению в фитомассе того или иного элемента можно судить об экологически значимом содержании его в почве.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Хаданович, А.В.** Механизм сорбции соединений тяжелых металлов некоторыми видами почв / А.В. Хаданович // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. Биология. – 2005. – № 4 (31). – С.84 – 90.
2. **Хаданович, А.В.** Поглощение тяжелых металлов почвенно-поглощающим комплексом в сосняке мшистом / А.В. Хаданович [и др.] // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. Биология. – 2003. – № 5 (13). – С. 42-46.
3. **Хаданович, А.В.** Особенности сорбции меди дерново-подзолистой почвой в присутствии цинка / А.В. Хаданович, В.Г. Свириденко // Природнае асяроддзе Палесся: сучасны стан і яго змены: матэрыялы навук. польска-ўкраінска-беларускай канф. / НАН Беларусі, Брэст, 2004. – Ч. 1. – С. 222-225.
4. Аккумуляция свинца, цинка и кадмия в зеленых насаждениях г. Минска / К.Д. Чубанов [и др.] // Природные ресурсы. – 2000. – № 4. – С. 68 –75.
5. **Черных, Н.А.** Экотоксические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами / Н. А. Черных, Н.З. Милащенко, В.Ф. Ладонин. – М.: Агропромиздат, 1990. – 287 с.
6. **Ладонин, Д.В.** Особенности специфической сорбции меди и цинка некоторыми почвенными минералами / Д.В. Ладонин // Почвоведение. – 1997. – № 12. – С. 1474-1485.
7. **Савченко, С.В.** Закономерности распределения микроэлементов в пойменных экосистемах урбанизированных территорий / С.В. Савченко // Природные ресурсы. – 2000. – № 3. – С. 112 –119.
8. **Хаданович, А.В.** Особенности распределения и иммобилизации ионов тяжелых металлов в системе почва – растения (на примере Гомельского региона): автореф. дис. ...канд. хим. наук: 03.00.16 / А.В. Хаданович; Гом. гос. ун-т. – Гомель, 2008. – 22 с.
9. **Головатый, С.Е.** Тяжелые металлы в агросистемах Республики Беларусь / С.Е. Головатый; под ред. Т.В. Левитана. – Минск: унитарн. предпр. Институт почвовед. и агрохим., 2002. – 235 с.

10. Справочно-статистические материалы о состоянии окружающей среды и природоохранной деятельности в Республике Беларусь (на 1 янв. 2000 г.) / М-во природ. ресурсов и охраны окруж. среды РБ; отв. за вып. А.А. Матесович, С.А. Лупач. – Мн., 2000. – 54 с.

Поступила в редакцию 11.01.2010 г.

ЗВЕСТКІ ПРА АЎТАРАЎ

- ЖАСТКОЎ**
Сяргей Васільевіч – доктар фізіка-матэматычных навук, прафесар, загадчык кафедры матэматычнага аналізу, інфарматыкі і вылічальнай тэхнікі МДУ імя А.А. Куляшова
- РАМАНЕНКА**
Аляксей Андрэевіч – кандыдат фізіка-матэматычных навук, дацэнт кафедры вышэйшай матэматыкі Беларуска-Расійскага ўніверсітэта
- ВОСТРЫКАЎ**
Алег Міхайлавіч – кандыдат фізіка-матэматычных навук, дацэнт кафедры апрацоўкі матэрыялаў ціскам ГДТУ імя П.В. Сухога
- ЦІМОШЧАНКА**
Алена Валер’еўна – выкладчык кафедры эксперыментальнай і тэарэтычнай фізікі МДУ імя А.А. Куляшова
- ЮРЭВІЧ**
Уладзімір Антонавіч – доктар фізіка-матэматычных навук, прафесар кафедры фізікі Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта харчавання
- КАЦЯШОЎ**
Яўген Алегавіч – аспірант кафедры эксперыментальнай і тэарэтычнай фізікі МДУ імя А.А. Куляшова
- АКУЛІЧ**
Мікалай Васільевіч – кандыдат біялагічных навук, дацэнт, загадчык лабараторыі экалагічнай фізіялогіі РЦКК даследчым абсталяваннем і прыборамі МДУ імя А.А. Куляшова
- КРУЧЫНСКІ**
Мікалай Генрыхавіч – доктар медыцынскіх навук, дацэнт, прафесар кафедры медыцыны і лячэбнай фізкультуры Беларускай медыцынскай акадэміі паслядыпломнай адукацыі
- МЯЛЬНОЎ**
Сяргей Барысавіч – доктар біялагічных навук, прафесар, прарэктар па навукавай працы Міжнароднага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.Д. Сахарава
- ЛІВІНСКАЯ**
Вікторыя Аляксандраўна – кандыдат фізіка-матэматычных навук, дацэнт кафедры эканамічнай інфарматыкі Беларуска-Расійскага ўніверсітэта
- ПЕТРАНЁЎ**
Данііл Рудольфавіч – старшы навуковы супрацоўнік лабараторыі эндакрыналогіі і біяхіміі ДНУ “Інстытут радыёбіялогіі НАНБ”
- МАТВЕЙЧУК**
Юлія Уладзіміраўна – магістрант кафедры хіміі Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта харчавання
- ВІШНЕЎСКАЯ**
Святлана Міхайлаўна – спецыяліст РЦКК даследчым абсталяваннем і прыборамі МДУ імя А.А. Куляшова

- МАКСЕ**
Ларыса Паўлаўна – старшы выкладчык кафедры хіміі МДУ імя А.А. Куляшова
- ЯСІНЕЦКІ**
Валерый Уладзіміравіч – кандыдат хімічных навук, дацэнт кафедры хіміі Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта харчавання
- ТОМАЎ**
Аляксандр Васільевіч – кандыдат фізіка-матэматычных навук, начальнік РЦКК даследчым абсталяваннем і прыборамі МДУ імя А.А. Куляшова
- ХАДАНОВІЧ**
Альбіна Віктараўна – кандыдат хімічных навук, дацэнт кафедры хіміі ГДУ імя Ф. Скарыны
- СВІРЫДЗЕНКА**
Валянціна Рыгораўна – кандыдат хімічных навук, дацэнт кафедры хіміі ГДУ імя Ф. Скарыны
- ДРАЗДОВА**
Наталля Іванаўна – кандыдат хімічных навук, дацэнт кафедры хіміі ГДУ імя Ф. Скарыны

SUMMARIES

Akulich N.V., Kruchinsky N.G., Melnov S.B., Livinskaya V.A. DIAGNOSTICS OF PORTENTS OF ATHEROSCLEROSIS AMONG CHILDREN.

Clinical parameters of health of children and teenagers who reside in an ecologically unfavorable district in Mogilev are investigated. An increase in the thickness of an intima-media complex is revealed. It is found that this increase correlates closely with parameters of the volume distribution of erythrocytes and platelets, with the erythrocyte quantity and the hematocrit value, thus testifying the presence of connections between atherogenesis and hemapoiesis. The high diastolic arterial pressure of these children depends on a level of apparent molecular weight substances and correlates inversely with the erythrocyte value. Some symptoms of genome instability such as a higher level of dicentric and ring chromosomes and polyploid cells are marked. An analysis of the frequency of mutant T-helpers testifies a distinct and significant increase in the genovation frequency as compared with a control group composed of children from ecologically more favorable districts of Mogilev. It applies equally to the micronucleus frequency.

Khadanovich A.V., Sviridenko V.G., Drozdova N.I. THE DISTRIBUTION OF IONS OF LEAD AND CADMIUM IN SYSTEM "SOIL-PLANT" IN CONDITIONS OF NATURAL PHYTOCENOSIS.

The relationships for sorption of lead and cadmium by soils and plants have been studied. Coefficients of heavy metal ions distribution in the solid soil – plant systems under conditions of hard technogene load have been received; rows of accumulation of the metal ions under consideration by plants in natural phytocenosis and by the cultivated herbs have been ascertained.

Kotyashov E.O. COMPUTER MODELING OF COHERENT INTERACTION OF ULTRA-SHORT LASER PULSE WITH ACTIVE MEDIUM.

The article deals with the method of finite differences in time domain (FDTD) used for modeling ultra-speed dynamics of radiation in two-level active medium.

Matveichuk Yu.V., Vishnevskaya S.M., Maxe L.P., Yasinetskiy V.V., Tomov A.V. INVESTIGATION OF THERMOLYSIS OF HYDROXOCOMPOUNDS OF ZINC TG, DTG, DSC TECHNIQUES.

The thermolysis of zinc carbonate hydroxide, amorphous and crystalline zinc hydroxide samples was studied with TG, DTA, DSC techniques combined with FTIR-spectroscopy. Minimum decomposition temperatures, thermal effects and sequence of chemical transformations were determined.

Ostrikov O.M. PLASTIC DEFORMATION OF AMORPHOUS MATERIAL ON THE IRON FRAMEWORK.

The regularity of the formation of shift bands of amorphous material on the iron framework is studied with the help of the method of local warping. Quantitative characteristics for the analysis of the plastic deformation of amorphous material are proposed. Mechanisms of the formation of shift bands in indenter stress fields are examined.

Petrenyov D.R. ALTERNATIONS IN OXIDATIVE METABOLISM OF PERITONEAL MACROPHAGES IN YOUNG RATS UNDER PROLONGED EXPOSURE TO RADIATION OF MOBILE PHONES OF GSM 900 MHZ BAND.

The consequences of two-week fractionated (8 hr per day) exposure young Wistar rats to electromagnetic fields, imitating signal of mobile phones of GSM 900 Mhz standard during call, have been studied. The increased reactive nitrogen (RNS) and oxygen (ROS) species basal production in resident peritoneal macrophages were found after cessation of exposure to factor of studying. Such conservative functions of macrophages, as phagocytosis and functional response to bacterial endotoxin (LPS) and phorbol ether (PMA) were altered insignificantly and kept in normal range. The hypothesis about relationships between increased level of endogenous ROS and RNS production and increased risks of genotoxic effects of chronic exposure to nonionizing electromagnetic radiation are discussed in the article.

Keywords: non-ionizing electromagnetic radiation, biological effects, reactive oxygen and nitrogen species, macrophages

Tsimoshchanka (Glasunova) E.V., Yurevich V.A. TRANSFORMATION OF SHORT OPTICAL PULSES AT REFLECTION BY A THIN NONLINEAR LAYER.

The super-short light pulses reflected by a nonlinear boundary layer at presence of subsurface resonant and quasi-resonant polarization should get precise self-modulation substructure of intensity. The origin of high-frequency self-modulation of reflected signals – in the superradiating properties of reflection shown in conditions of equilibrium state bistability of oscillatory system, consisted by a thin film of active atoms and resonant radiation.

Zhestkov S.V., Romanenko A.A. ON THE STUDY OF NEW FORMS OF WAVE SOLUTIONS OF TWO-DIMENSIONAL FISHER AND LOTKA-VOLTERRA EQUATIONS.

The direct method of constructing of wave solutions of two-dimensional Fisher and Lotka-Volterra equations is developed. The sufficient conditions of the existence of wave solutions are obtained.