

Вестник Сыктывкарского университета (научный журнал)	Серия 2 физика химия биология	Выпуск 1 2006
---	---	------------------------------------

СОДЕРЖАНИЕ

От редакционной коллегии	3
СТАТЬИ	
Физика	
<i>Котов Л.Н., Власов В.С., Уляшев А.М.</i> Релаксация намагниченности и автоколебания в ферритовых пленках с магнитоупругой связью	4
<i>Антонец И.В., Котов Л.Н., Некипелов С.В.</i> Влияние поверхности подложек на формирование тонких металлических пленок	14
<i>Котов Л.Н., Носов Л.С.</i> О магнитной переориентации однодоменных антиферромагнитных частиц	26
<i>Калинин Ю.Е., Котов Л.Н., Петрунёв С.Н., Ситников А.В., Антонец И.В., Сметанин А.И.</i> Особенности проводящих и отражающих свойств композитных плёнок $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$	34
<i>Гольчевский Ю.В., Котов Л.Н., Уляшев А.М.</i> Влияние параметра диссипации на магнитные спектры и время релаксации	43
<i>Сивков В.Н., Виноградов А.С., Некипелов С.В., Сивков Д.В., Vyalkh D.V. and Molodtsov S.L.</i> Применение абсорбционных Ti-фильтров для абсолютных измерений сечений поглощения в области N1s — края азота в пленках $NaNO_3$ с использованием синхротронного излучения	60
Химия	
<i>Брач Б.Я., Низовцев А.Н.</i> Получение пористой керамики из гидроксипатита кальция, допированного хромом и магнием	70
<i>Жук Н.А., Пийр И.В., Филиппов В.Н.</i> К вопросу о фазовых соотношениях в системе $Bi_2O_3-Nb_2O_5-Cr_2O_3$	73
<i>Залевская О.А., Конева О.Н., Кучин А.В.</i> Хиральные комплексы палладия на основе природных монотерпеноидов. Палладирование оксима (1S)-(-)-камфоры	80
<i>Белых Д.В., Тулаева Л.А., Холопова Е.В., Селькова И.А., Кодесс М.И., Кучин А.В.</i> Синтез и реакции цинкового комплекса метилфеофорбида (а)	85

Биология	
<i>Долгин М.М., Акулова Л.И., Таскаева А.А.</i> Влияние газопровода на почвенных беспозвоночных	93
<i>Доровских Г.Н., Степанов В.Г.</i> Возраст хозяина и структура компонентных сообществ паразитов у гольяна обыкновенного <i>RHOXINUS RHOXINUS</i> (L.)	102
<i>Мойсеенко Н.А., Петрова Н.Б., Иванкова Ж.Е., Релина Е.Н.</i> Действие фитоэкдистероидов на количественные и качественные показатели крови млекопитающих в норме и при экспериментальных воздействиях	122
ФАКТЫ, СОБЫТИЯ, ЛЮДИ	
<i>Брач Б.Я.</i> Ирина Вадимовна Пийр (к 50-летию со дня рождения)	138
<i>Кучин А.В.</i> Ольга Александровна Залевская (к 50-летию со дня рождения)	140
<i>Долгин М.М.</i> Геннадий Николаевич Доровских (к 50-летию со дня рождения)	142
ИНФОРМАЦИИ	
<i>Брач Б.Я.</i> О создании и деятельности Коми республиканского отделения Всероссийского общества охраны природы	144
Сведения об авторах	147

РЕДКОЛЛЕГИЯ СЕРИИ 2

Б.Я. Брач (отв. редактор);

М.М. Долгин (отв. за выпуск);

Л.И. Иржак, Л.Н. Котов, А.В. Кучин, В.Н. Сивков

Адрес редакции
Вестника Сыктывкарского университета
167001 Сыктывкар, Октябрьский пр., 55.
Тел. / факс (821-2) 43-68-20.

Главный редактор **Н.А. Тихонов**

Редактор Е.М. Насирова
Компьютерный макет А.А. Пруцевой
Корректор С.Б. Свигзова

Подписано в печать 24.04.2006. Печать офсетная.
Гарнитура Arial. Бумага офсетная. Формат 60x84/16.
Усл.-печ.л. 9,3. Уч.-изд.л. 9,0.
Заказ № 28. Тираж 530 экз.

РИО СыктГУ
167001. г. Сыктывкар, Октябрьский пр., 55

От редакционной коллегии

Сыктывкарский государственный университет продолжает издавать результаты научных исследований профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов, сотрудников КНЦ УрО РАН и других вузов.

В соответствии с утвержденным приказом Министерства образования РФ от 06.04.2004 г. в новой структуре «Вестника Сыктывкарского университета» будет издаваться серия 2: физика, химия, биология. Первый номер такого сборника подготовлен.

Редакция выражает надежду на то, что сборник окажется полезен широкому кругу преподавателей высших учебных заведений и специалистов.

Ответственность за логику изложения материала и точность справочного аппарата несут авторы статей.

Проф. Б.Я. Брач

СТАТЬИ

Физика

Л.Н. Котов, В.С. Власов, А.М. Уляшев
Сыктывкарский госуниверситет

Релаксация намагниченности и автоколебания в ферритовых пленках с магнитоупругой связью

Исследована динамика намагниченности в ферритовой плёнке вблизи нелинейного магнитоакустического резонанса для различных значений параметра магнитной диссипации. Выявлено возникновение неравномерного распределения энергии между магнитной и упругой подсистемами при условии магнитоакустического резонанса. Определён интервал значений параметра магнитной диссипации, в котором наблюдается нелинейная релаксация и сильное затухание намагниченности. При наличии некоторой расстройки по акустической частоте относительно частоты магнитоакустического резонанса во время действия переменного поля при некоторых значениях амплитуды переменного поля наблюдается автоколебательный режим магнитоупругих колебаний.

В последнее время интерес к динамике нелинейных систем связан с важностью и фундаментальностью задачи, а также возможными практическими приложениями. Например, нелинейное взаимодействие переменных магнитных полей с ферритовыми частицами может быть основой для создания накопителей информации и СВЧ магнитоакустических преобразователей [1, 2]. Наиболее подробно поведение магнитной подсистемы без учета магнитоупругой связи изучено в работах [1, 3-5]. Наличие магнитоупругой связи может существенно изменять динамические свойства частиц и времена релаксации магнитной и упругой подсистем, в особенности в области магнитоакустического резонанса. В работе приведены результаты исследований возбуждения, релаксации магнитоупругих колебаний в ферритовой плёнке вблизи магнитоакустического резонанса с различной степенью потерь в магнитной подсистеме. При этом возбуждение осуществляется мощным радиочастотным магнитным полем. Современная экспериментальная техника пока не позволяет проверить экспериментально эффекты, рас-

сматриваемые в работе. Поэтому важным является моделирование процессов, происходящих в реальной ферритовой плёнке.

Модель, основные уравнения

Рассмотрим монокристаллическую ферритовую тонкую плёнку. Внешнее постоянное поле H_0 , которое больше по величине поля насыщения H_s , направим перпендикулярно плоскости плёнки и вдоль кристаллографического направления $[001]$, совпадающего с осью OZ . Рассмотрим случай линейной поляризации переменного поля с его направлением вдоль оси OX . Как известно [2], для большинства ферритов наиболее связанными с магнитной подсистемой являются поперечные упругие колебания. Рассматривая только поперечные упругие колебания, учтём только одну компоненту вектора механического смещения u_x . При достаточно больших мощностях импульсов переменного магнитного поля амплитуда прецессии намагниченности будет ограничиваться процессами параметрического распада, которых можно избежать, возбуждая прецессию на частоте, соответствующей дну спектра спиновых волн, т.е. при данной конфигурации полей на частоте ферромагнитного резонанса (ФМР) $\omega_s = 2\pi/T_s$ [5]. Рассмотрим однородные колебания намагниченности, которые возбуждают упругие моды в плёнке и наоборот. Граничные условия на поверхности плёнки учтём отсутствием механического напряжения при $z = \pm L/2$, L — толщина плёнки по оси OZ . Механическое смещение в этом случае можно представить в следующем виде:

$$u_x = -\frac{b_2}{c_2} m_x m_z z + \sum_{n=0}^{\infty} u_{2n+1} \sin\left(\frac{(2n+1)\pi z}{L}\right), \quad (1)$$

где b_2, c_2 - вторая константа магнитоупругости и постоянная упругости второго порядка, m_i — компоненты единичного вектора намагниченности ($i = x, y, z$), u_{2n+1} — амплитуды упругих мод ($n = 0, 1, 2, \dots$). Для описания магнитоупругих колебаний плёнки используем известную систему уравнений, состоящую из уравнения Гильберта [3], с учетом внутренних полей кроме обменного, и уравнения для u_x [2]. Усредняя уравнения по координате z внутри плёнки, получим бесконечномерную систему нелинейных дифференциальных уравнений [6]:

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = -\gamma \left[\mathbf{m} \times H_{\text{eff}} \right] + \alpha \left[\mathbf{m} \times \frac{d\mathbf{m}}{dt} \right], \quad (2)$$

$$\frac{d^2 u_{2n+1}}{dt^2} + 2\Gamma \frac{du_{2n+1}}{dt} + (\Omega_{2n+1}^2 + \Gamma^2) u_{2n+1} = \frac{(-1)^n 4Lb_2}{(2n+1)^2 \pi^2 c_2} \left[\frac{d^2}{dt^2} (m_x m_z) + 2\Gamma \frac{d}{dt} (m_x m_z) \right], \quad (3)$$

где \hat{m} — единичный вектор намагненности, γ — гиромагнитное отношение, компоненты эффективного поля равны:

$$H_{\text{eff } x} = -2m_x \{A_z m_y^2 + m_z^2 K_1^* + K_u^*\} - m_z B + h_x(t),$$

$$H_{\text{eff } y} = -2m_y \{A_x m_z^2 + m_x^2 K_1^* + K_u^*\}, \quad H_{\text{eff } z} = -2m_z \{A_y m_x^2 + m_y^2 K_1^*\} - m_x B + C,$$

$$A_i = K_1^* + K_2^* m_i^2, \quad i = x, y, z, \quad K_j^* = K_j / M_s \quad (j = 1, 2, u),$$

α — параметр диссипации колебаний намагненности,

K_1, K_2 - первая и вторая константы анизотропии, K_u — константа наведенной одноосной ростовой анизотропии,

$$B = B_2 \left(\frac{2}{L} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n u_{2n+1} - \frac{b_2}{c_2} m_x m_z \right), \quad B_2 = b_2 / M_s, \quad M_s \text{ — намагненность насыщения ферритового материала, } h_x(t) = h_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \text{ — переменное поле, } h_0, \omega_0, \varphi_0 \text{ — амплитуда, частота и начальная фаза поля,}$$

$$C = H_0 - \sigma m_z, \quad \sigma = 4\pi M_s, \quad \Omega_{2n+1} = \sqrt{\frac{c_2}{\rho}} \frac{\pi(2n+1)}{L}, \quad \rho \text{ - плотность ферритового}$$

материала плёнки, Γ — константа затухания упругих колебаний.

Численное решение системы (2-3) находилось при помощи метода Рунге-Кутты 8 порядка. При расчетах использовались параметры ферритового материала монокристаллической плёнки из марганец-цинковой шпинели состава $\text{Mn}_{0.42}\text{Zn}_{0.44}\text{Fe}_{2.145}\text{O}_4$ [2]: $M_s = 600 \text{ Gs}$, $K_1 = 4000 \text{ erg/cm}^3$,

$$K_2 = -1000 \text{ erg/cm}^3, \quad K_u = -1000 \text{ erg/cm}^3, \quad b_2 = 18.3 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3, \quad \Gamma = 10^5 \text{ s}^{-1}.$$

Результаты вычислений для колебаний намагненности в плёнке без учета магнитоупругой связи ($b_2 = 0$) аналогичны [5]. При возбуждении плёнки переменным полем вектор намагненности выходит на стационарную орбиту, где совершает как прецессионное, так и нутационное движения. Параметры орбиты, амплитуда и частота нутации при этом определяются величиной констант анизотропии и амплитудами внешних полей.

Рассмотрим особенности колебаний намагниченности при выполнении условий магнитоакустического резонанса (МАР) [7]. Пусть для плёнки выполнено условие ФМР, а собственная акустическая частота колебаний Ω_1 находится вблизи ω_s . Для упрощения задачи рассмотрим возбуждение только 1-й акустической моды. Тогда система (2-3) сведётся к системе из четырёх дифференциальных уравнений. Анализ решений этих уравнений показывает, что вдали от акустического резонанса магнитоупругая связь является достаточно слабой и не оказывает влияния на колебания намагниченности. По мере приближения акустической частоты колебаний Ω_1 к значению ω_s амплитуда упругих колебаний растёт при уменьшении амплитуды магнитных колебаний.

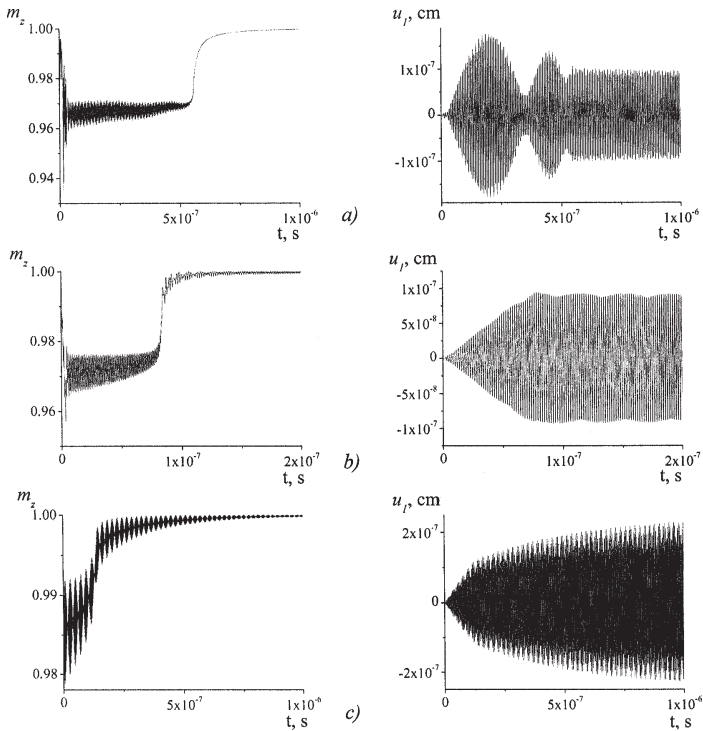


Рис.1. Зависимость m_z и u_r от времени при действии переменного поля.

$$H_0 = H_S + 10 \text{ Oe}, h_0 = 20 \text{ Oe}, \Gamma = 10^5 \text{ s}^{-1}, \alpha = 0.01 \text{ (a)}, 0.1 \text{ (b)}, 0.5 \text{ (c)}$$

На рисунке 1 показаны зависимости компоненты единичного вектора намагниченности m_z и амплитуды первой акустической моды u_1 от времени действия переменного поля при условии МАР для разных значений α . Как видно из рисунка 1, колебания намагниченности характеризуются нелинейной релаксацией при выполнении условий МАР. Затухание колебаний при определённых параметрах релаксации ($\alpha = 0.05 \div 0.2$), при которых наблюдается наиболее эффективная магнитоупругая связь, характеризуется, по крайней мере, тремя временами релаксации (рис. 1 а, б). Первое время — время выхода на максимальное отклонение вектора намагниченности — имеет порядок нескольких периодов колебаний. Второе время — время колебаний на промежуточной стационарной орбите — имеет величину $10^2 T_s$. Третье время имеет величину порядка $10 T_s$ и характеризует возвращение вектора намагниченности к положению, близкому к равновесному, около которого совершаются колебания небольшой амплитуды. При других значениях α релаксация имеет почти линейный характер (рис. 1 с). Также из рисунка 1 видно, что время установления стационарных упругих колебаний $\tau_e \approx \tau_r$, где τ_r — суммарное время релаксации намагниченности. Поэтому времена τ_r и τ_e имеют смысл времени установления стационарного режима магнитоупругих колебаний. Время τ_e определяется параметром магнитной диссипации α . Анализ динамики магнитной и упругой подсистем, сделанный на основе рисунка 1, показывает, что при условии МАР в процессе установления стационарного режима колебаний, происходит нарушение равномерного распределения энергии между магнитной и упругой подсистемами. По прошествии некоторого времени действия переменного поля при условии МАР большая часть энергии передаётся из магнитной подсистемы в упругую подсистему, амплитуда упругих колебаний при этом доходит до насыщения, а магнитные колебания сильно затухают.

На рисунке 2 изображена зависимость времени релаксации намагниченности τ_r от разности постоянного поля и поля насыщения, а также параметра диссипации намагниченности α . Как видно из рисунка 2-3, время τ_r сильно зависит от параметра диссипации α . Для очень малых α время τ_r стремится к бесконечно большому значению. Для больших значений $\alpha \geq 0.25$ (значение $\alpha \approx 0.25$ определяется размагничивающим полем, т.е. формой частицы и величиной намагниченности) время τ_r медленно возрастает. Область минимальных значений времени τ_r наблюдается в интервале $\alpha \approx 0.05 \div 0.15$, ширина которого уменьшается при увеличении постоянного поля. В этом интервале значений α наблюдается резкое затухание намагниченности. Это объясняется наиболее сильной магнитоупругой связью в этом интервале значений α .

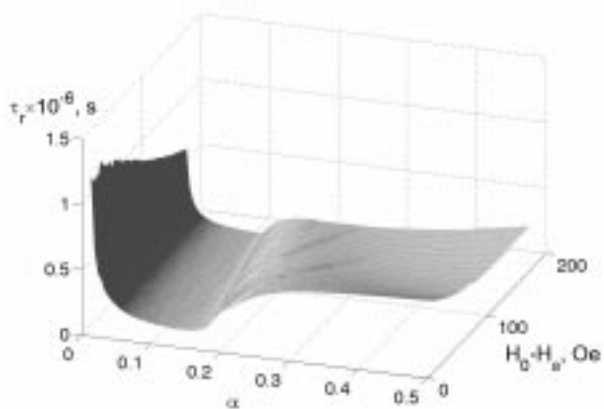


Рис. 2. Зависимость времени релаксации τ_r от разности $H_0 - H_S$ и параметра диссипации намагниченности α . $h_0 = 20$ Ое, $\Gamma = 10^5 \text{ s}^{-1}$

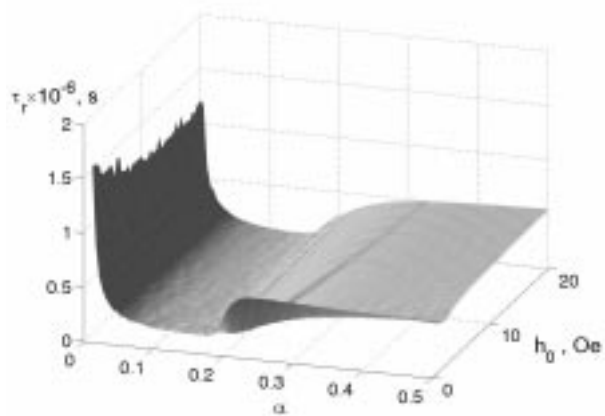
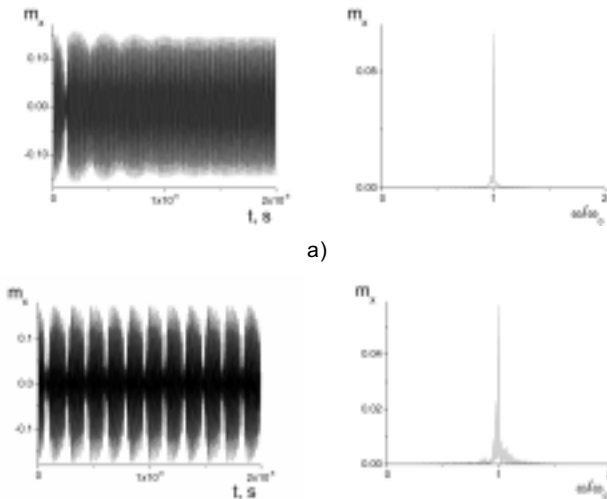


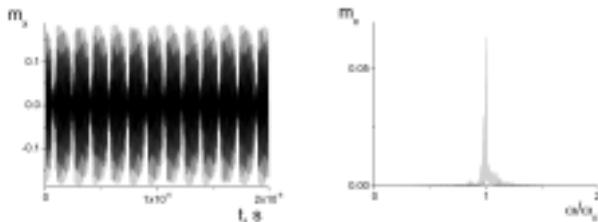
Рис. 3.

Зависимость времени релаксации τ_r от амплитуды переменного поля и параметра диссипации намагниченности α . $H_0 = H_S + 10$ Ое, $\Gamma = 10^5 \text{ s}^{-1}$

Характеры зависимостей времени релаксации τ_r от амплитуд переменного и постоянного полей аналогичны. Отличительная особенность поведения $\tau_r(\alpha)$ наблюдается при малых амплитудах переменного поля. При таких амплитудах поля поведение $\tau_r(\alpha)$ характеризуется резким увеличением времени релаксации на границе области минимальных значений τ_r (рис. 3). Это может быть связано с возрастанием нелинейности системы и при очень малых амплитудах поля. Наличие нелинейной релаксации, описанной ранее, приводит к возникновению нового явления — автоколебательной неустойчивости магнитоупругих колебаний. Это явление заключается в следующем. При наличии относительной расстройки $R = (\omega_s - \Omega_1)/\omega_s$ собственной акустической частоты колебаний Ω_1 от частоты ФМР ω_s в определенном интервале значений амплитуды переменного поля во время его действия могут возникнуть автоколебания намагниченности и механического смещения. Причем период этих автоколебаний много больше периода колебаний переменного поля. Период автоколебаний определяется значением амплитуды переменного поля, величиной расстройки частоты R и параметром диссипации намагниченности α . При появлении магнитоупругих автоколебаний меняется как спектр компонента намагниченности, так и механического смещения. Причем это происходит при некоторой амплитуде переменного поля, которую можно назвать порогом возбуждения автоколебаний.



b)



с)

Рис. 4. Зависимость m_x от времени

и его спектр при различных амплитудах переменного поля.

$H_0 = H_s + 10$ Ое, $\alpha = 0.2$, $\Gamma = 10^5$ с $^{-1}$, $R = 0.15$, $h_0 = 8$ Ое (а), 10 Ое (б), 12 Ое (с)

Таким образом, возникновение магнитоупругих автоколебаний можно объяснить наличием неустойчивой релаксации намагниченности, которая чётко наблюдалась при точном соблюдении условий МАР.

На рисунке 4 показаны зависимости m_x от времени и их спектры во время действия переменного поля, которые иллюстрируют зарождение автоколебаний. На рисунке 4а порог возбуждения автоколебаний не достигнут и колебания намагниченности подобны случаю отсутствия магнитоупругой связи [5]. На рисунке 4б амплитуда переменного поля незначительно превышает порог возбуждения автоколебаний.

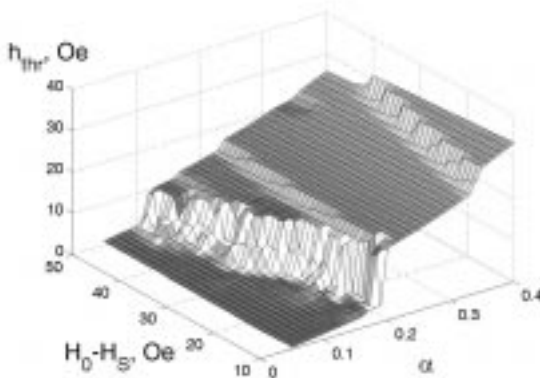


Рис. 5. Зависимость порога возбуждения автоколебаний от разности $H_0 - H_s$ и параметра диссипации намагниченности α . $\Gamma = 10^5$ с $^{-1}$, $R = 0.15$

Из сравнения спектров, показанных на рисунке 4а и 4б, видно, что при появлении автоколебаний около основной первой гармоники колебаний m_x появляются сателлитные составляющие. При дальнейшем увеличении амплитуды поля наблюдаются сформировавшиеся автоколебания (рис. 4с), для которых характерны большая амплитуда 1-й гармоники и расширение спектра высокочастотных составляющих. Значительная амплитуда поля приводит к процессу гашения автоколебаний, при котором магнитоупругие колебания не испытывают неустойчивой релаксации намагниченности. На рисунке 5 изображена зависимость порога возбуждения автоколебаний (амплитуды поля h_{thr}) от параметра диссипации α и от постоянного поля. Видно, что порог возбуждения автоколебаний сильно зависит от значения α . Наблюдаются, по крайней мере, три области α , при которых резко возрастает значение порогового поля h_{thr} . Особенно сильное возрастание h_{thr} наблюдается при $\alpha \approx 0.1 - 0.25$. Значения α , для которых характерны скачки h_{thr} , растут для первого скачка и уменьшаются для второго и третьего скачков при уменьшении постоянного магнитного поля. Явление резкого роста порога возбуждения автоколебаний при первом скачке связано со значительным уменьшением связи между магнитной и упругой подсистемами, что приводит к увеличению порогового значения амплитуды переменного поля, при которой появляется неустойчивая релаксация намагниченности.

Таким образом, в работе выявлены особенности поведения магнитных и упругих колебаний в ферритовых тонких плёнках вблизи нелинейного ФМР при различной эффективности магнитоупругой связи для широкого интервала значений параметра магнитной диссипации. Обнаружено наличие трёх областей релаксации колебаний намагниченности при точном выполнении условий МАР, во время действия переменного поля, при определённых значениях параметра магнитной диссипации. Причем релаксация намагниченности является нелинейной: она становится существенной лишь в конце интервала времени релаксации. Можно сделать вывод, что наблюдаемая релаксация должна быть характерна и для других двух связанных нелинейных систем с близкими собственными частотами, но разными частотами релаксации. Выявлены механизмы диссипации и преобразования энергии переменного поля в магнитоупругую энергию в плёнках, для которых выполняется условие магнитоакустического резонанса.

При наличии некоторой расстройки собственной акустической частоты от частоты ФМР, при определенных значениях амплитуды переменного поля могут наблюдаться магнитоупругие автоколебания. При разработке СВЧ устройств с учётом магнитоупругой связи, в первую очередь гиперзвуковых усилителей, необходимо учитывать наличие пред-

сказанных релаксационных процессов и возникновение магнитоупругих автоколебаний, при которых отсутствует устойчивая релаксация.

* * *

1. Котов Л.Н., Носов Л.С. // ПЖТФ. 2003. Т. 29. № 20. С. 38.
2. Голдин Б.А., Котов Л.Н., Зарембо Л.К. и др. Спин-фононные взаимодействия в кристаллах (ферритах). Л.: Наука, 1991. С. 40.
3. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994. С. 26.
4. Шутый А.М., Семенов Д.И. // ФТТ. 2001. Т. 43. № 8. С. 1439.
5. Шутый А.М., Семенов Д.И. // ФТТ. 2002. Т. 44. № 4. С. 734.
6. Власов В.С., Котов Л.Н., Асадуллин Ф.Ф. Сб. тр. междунар. семинара «Выездная секция по проблемам магнетизма в магнитных пленках, малых частицах и наноструктурных объектах». Астрахань. С. 37.
7. Физика магнитных диэлектриков / Г.А. Смоленский, В.В. Леманов, Г.М. Недлин, М.П. Петров, Р.В. Писарев. Л.: Наука, 1974. С. 315.

И.В. Антонец, Л.Н. Котов, С.В. Некипелов
Сыктывкарский госуниверситет

Влияние поверхности подложек на формирование тонких металлических пленок

Приведены результаты АСМ-исследования наноструктуры поверхности тонких рентгеноаморфных пленок серебра, меди и железа толщиной 40-60 нм, нанесенных в условиях неглубокого вакуума методом термического осаждения на стеклянную подложку, текстолит и полимерную рентгеновскую пленку при комнатной температуре. Получены изображения поверхности тонких пленок на растровом электронном микроскопе с применением энергодисперсионного анализа для оценки микроуровневого строения пленок и контроля состава поверхности подложек и пленок. Показано, что в тонких пленках толщиной в десятки нанометров строение поверхности подложки оказывает существенное влияние на морфологию поверхности и структуру металлических пленок.

Исследованию наноструктуры тонких металлических плёнок, выращенных различными методами и нанесенных на подложки из различных материалов, уделяется значительное внимание [1-13]. В этих работах результаты исследований морфоструктуры поверхности являются важнейшим инструментом для описания проводящих, отражающих, электромагнитных и электродинамических свойств тонких пленок.

Происходящее на наших глазах бурное развитие нанотехнологий стимулирует выявление все более новых особенностей в строении пленок, толщина которых составляет десятки и даже единицы нанометров. В последнее время активно исследуется аморфное состояние вещества [14-18]. В первую очередь это связано с некоторыми отличиями в свойствах аморфных металлических пленок по сравнению с пленками, имеющими кристаллическую структуру или её фрагменты. Возможные причины таких отличий подробно обсуждаются в [1]. Кроме того, описывая различные свойства тонких пленок, необходимо также учитывать и особенности подложки, на которую нанесена пленка. Шероховатость поверхности, чистота, материал подложки — все это оказывает непосредственное влияние и на свойства пленок. В частности, при исследовании проводящих свойств тонких рентгеноаморфных металлических пленок резкая зависимость проводимости от толщины нанесенных на текстолит пленок [2] была выявлена при толщинах, почти на порядок превышающих толщину пленок, нанесенных на рентгеновскую полимерную пленку [3]. Поэтому исследование морфологии поверхности пленки и подложки может явиться удобным инструментом для оценки структурированности материала пленок, с помощью которого можно будет прогнозировать их свойства. Основной целью данной работы явилась

оценка влияния морфологии и свойств подложки на строение тонких рентгеноаморфных пленок серебра, меди и железа, нанесенных на различные подложки.

Характеристика исследуемых образцов

В работе исследовались плёнки серебра, меди и железа, полученные путем термического вакуумного осаждения на подложки при комнатной температуре. Подложки были изготовлены из полимерного диэлектрика, текстолита и стекла. Толщина пленок варьировалась от 40 до 60 *нм*. В связи с этим можно говорить о том, что в работе использовались пленки различных металлов сравнимой толщины. Глубина вакуума была около 10^{-5} *Торр*. Скорость осаждения металла 10 *нм/с*. Такая большая скорость необходима для того, чтобы получать чистые металлические пленки с незначительным количеством примесей при неглубоком вакууме. В промышленном изготовлении тонкопленочных материалов часто используются именно такие скорости напыления.

Исследование пленок методом рентгеноструктурного анализа показало полное отсутствие дифракционных максимумов, характерных для кристаллического состояния, из чего можно заключить, что пленки являются рентгеноаморфными.

Приборы и методика эксперимента

Для исследования наностроения использовался атомно-силовой микроскоп (АСМ) ARIS-3500 фирмы «Burleigh Instruments Co», работающий в контактном режиме, рабочий диапазон сил взаимодействия зонд-поверхность в пределах 10^{-8} - 10^{-9} *Н*. Для регистрации ангстремного смещения кантилевера от положения равновесия в приборе использовалась стандартная оптическая система, состоящая из полупроводникового лазера и четырехсекционного диодного фотодетектора (рис. 1). Сфокусированный на кончике кантилевера луч лазера отражается в центр фотодетектора, включенного по дифференциальной схеме. Отклонения кантилевера регистрируются в виде разностного сигнала расфокусирования от окон фотодиода.

Для корректного исследования важнейшим условием является калибровка прибора как установление точного соотношения реальных координат в пространстве и соответствующих напряжений на пьезопроводе. Для калибровки использовалась дифракционная оптическая решетка с нанесенной на нее золотой пленкой, шаг которой составлял 4900 *линий/мм*. Максимальные области сканирования использованных в работе блоков АСМ составляют 7 \times 7 *мкм*. Для защиты от вибраций приборы располагались на массивной металлической плите, лежащей на слабонадутой авиационной камере. Для съемок использовались стан-

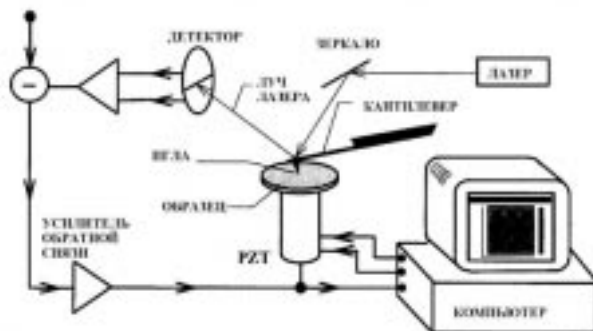


Рис. 1. Общая схема АСМ

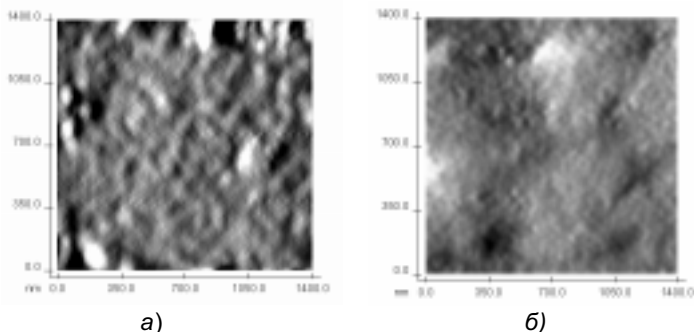
дартные промышленные кремниевые кантилеверы (Burleigh Instruments Co и Veeco Instruments), полученные методом анизотропного химического травления, на кончике которых сформированы кремниевые иглы пирамидальной формы. Радиус закругления кончика этих игл 8-10 нм, жесткость 0.1 Н/м.

Для исследования микроструктуры пленок и подложек использовался растровый электронный микроскоп JSM-6400 (Jeol), параллельно осуществлялся элементный контроль исследуемых поверхностей методом рентгеноспектрального микроанализа (с помощью анализатора «LINK», установленного на электронном микроскопе JSM-6400).

Основные результаты экспериментов и их обсуждение

1. Исследование морфологии поверхности подложки

Характерные изображения поверхностей полимерной рентгеновской пленки (а), покровного стекла (б) и текстолита (в) приведены на рисунке 2.



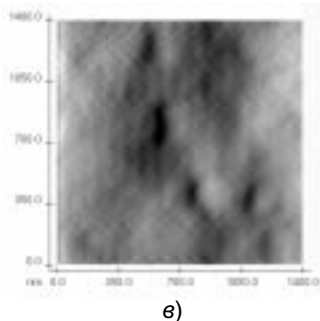


Рис. 2. Характерные изображения поверхностей подложек, полученные с помощью атомно-силового микроскопа:
а) полимерная рентгеновская пленка, б) покровное стекло, в) текстолит

Опишем морфологию поверхности использованных подложек. Поскольку составляющие пленки кластеры имеют субмикронные размеры, мы остановимся на аналогичных по величине морфологических характеристиках подложек.

Рентгеновские пленки (рис. 2а) имеют спутанно-волокнустую структуру, волокна довольно однородны по толщине, их диаметр составляет около 100 нм. Волокна располагаются не совсем плотно, между ними нередко наблюдается незаполненное пространство, на поверхности это выглядит как пористая структура. Максимальные линейные размеры таких пор в плоскости поверхности в среднем соответствуют диаметру волокон, шероховатость, обусловленная волокнустым строением, составляет 15-20 нм на участке 700x700 нм².

Поверхность стеклянной подложки (рис. 2б) состоит из уплощенных блоков размерами в сотни и тысячи нанометров произвольной формы, чаще всего не имеющих между собой четко выделяющихся границ. Хотя местами наблюдаются и трещины, разделяющие блоки. Поверхность самих блоков шероховатая, напоминающая шагреневую кожу, величина шероховатостей не превышает 3 нм, общий перепад рельефа на участках поверхности площадью 700x700 нм² составляет 5-10 нм.

Поверхность текстолита на микро-, наноуровне (рис. 2в) бугристая, но достаточно гладкая, со спорадически разбросанными порами. Средний перепад рельефа на участках поверхности площадью 700x700 нм² составляет 10-15 нм. Следует заметить, что поверхность использованных для наших исследований пластинок текстолита изначально является наиболее загрязненной различными частицами примесей, которые проявляют себя и в рельефе нанесенных пленок.

2. *Исследование морфологии поверхности пленок*

Основные результаты экспериментов иллюстрируются на рисунках 3-5, где показаны характерные поверхности пленок меди (рис. 3), железа (рис. 4) и серебра (рис. 5), нанесенных на рентгеновскую пленку (а), стеклянную подложку (б) и текстолит (в).

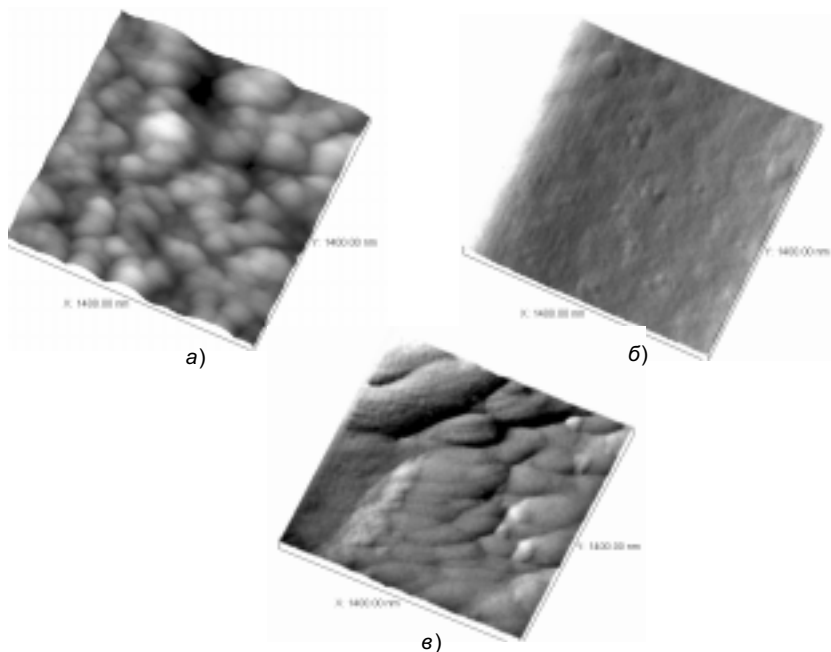


Рис. 3. Характерные АСМ-изображения поверхностей пленок меди, нанесенных на рентгеновскую пленку (а), стеклянную подложку (б) и текстолит (в)

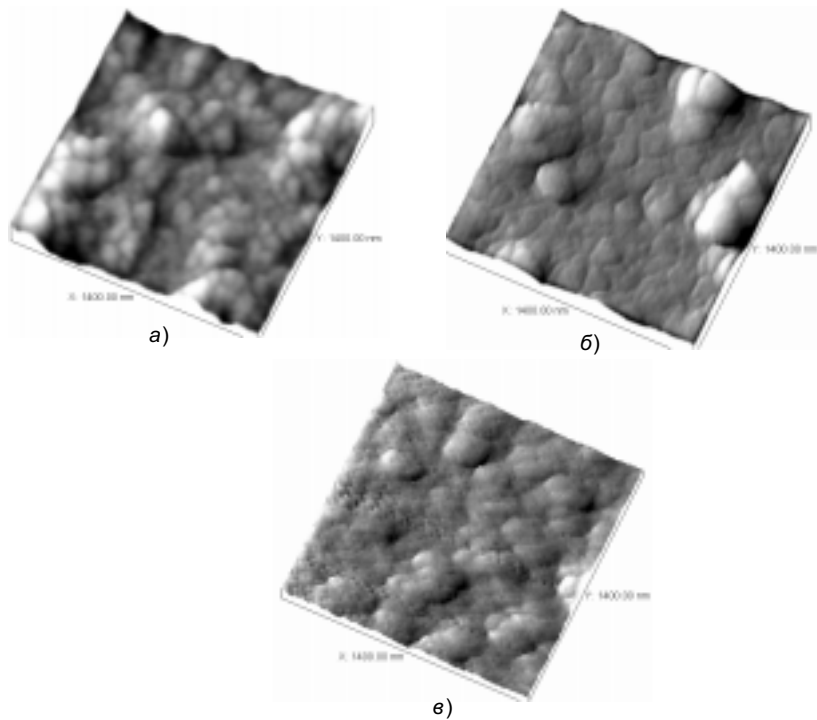


Рис. 4. Характерные АСМ-изображения поверхностей пленок железа, нанесенных на рентгеновскую пленку (а), стеклянную подложку (б) и текстолит (в)

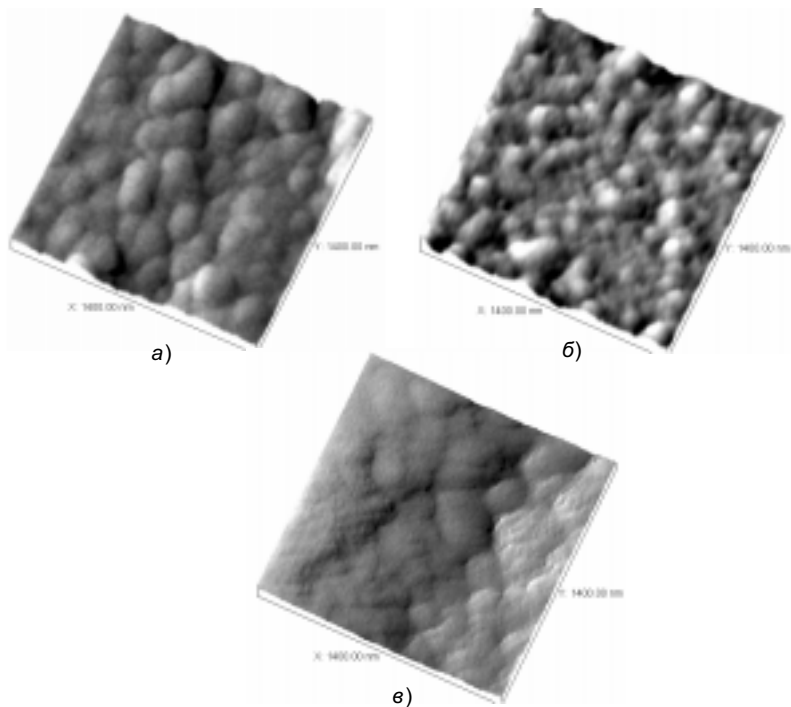


Рис. 5. Характерные АСМ-изображения поверхностей пленок серебра, нанесенных на рентгеновскую пленку (а), стеклянную подложку (б) и текстолит (в)

Медная пленка на полимерной подложке (рис. 3а) имеет кластерное строение. Кластеры округлой формы имеют среднестатистический размер 220 нм, однако разброс размеров значительный и характеризуется логнормальноподобным распределением с большой дисперсией. Кластеры располагаются неоднородно, формируя разнообразные агрегаты, от цепочечных до эллипсоидальных скоплений. Упаковка кластеров очень плотная, вследствие чего их формы часто определяются контактами с соседними кластерами, вдавленными друг в друга. При описании строения пленок мы не рассматриваем встречающиеся на поверхности практически всех пленок крупные (от сотен нанометров до нескольких микрон) островки, формирующиеся вследствие особенностей процесса конденсации тонких пленок при термическом напылении, а также крупные нарушения их однородности (прежде всего крупные трещины).

Медная пленка на стеклянной подложке (рис. 3б) имеет сплошное (однородное) строение, напоминающее строение поверхности самой подложки, только практически без разграничивающих кластеры трещин. Тем не менее фрагментарно просматриваются и обособленные кластеры, хотя они довольно неявно выражены, максимальные размеры их варьируются в пределах 200-300 нм. При этом рельефно такие кластеры редко выделяются на общем уплощенном фоне. Средняя шероховатость пленки на разных участках размером 700г700 нм² составляет 2-3 нм.

Медная пленка на текстолитовой подложке (рис. 3в) имеет натечный вид, в некоторых местах встречаются скорлуповатые остроконечные кластеры величиной 300-500 нм и ступеньки высотой 20-30 нм.

Похожее кластерное строение из округлых частиц практически изометричной формы имеет пленка железа на полимерной подложке (рис. 4а). Величина кластеров зависит от толщины плёнки, но в целом она меньше, чем у частиц, формирующих медные плёнки аналогичной толщины на данной подложке [2]. Формы агрегации кластеров аналогичны таковым медной пленки, так же, как и достаточно плотная упаковка. Средняя шероховатость варьируется в пределах 20-30 нм. В направлении длинных осей кластеров в целом невозможно выделить преобладающих направлений, они направлены хаотично, даже нередко в пределах одного агрегата.

Строение железной пленки на стеклянной подложке (рис. 4б) также имеет аналогичные медной плёнке черты — плоский рельеф, округлые кластеры, как бы приплюснутые сверху. Характерной чертой является «перетекание» одного кластера в другой через сравнительно небольшие участки непосредственного контакта, располагающиеся, как правило, на вершинах, через которые проходят длинные оси. В целом это напоминает срез агрегата из субпараллельно расположенных плотнейшим образом упакованных волокон, имеющих каплеобразные утолщения, вложенные друг в друга. Величина кластеров железных пленок на стеклянных подложках в целом больше, чем на полимерных, она составляет порядка 150 нм.

Пленка железа на текстолите (рис. 5в) имеет кластерное строение, местами явно выраженное, местами сглаженное, но тем не менее визуально проявляющееся. Кластеры имеют угловатую изометричную форму, их величина 15-20 нм. Средняя шероховатость пленки составляет 35 нм.

Пленки серебра на полимерной (рис. 5а) и стеклянной (рис. 5б) подложках имеют уже явно выраженное кластерное строение. Кластеры округлые, на стеклянной подложке практически сферической формы, на полимерной — слегка вытянутые преимущественно в одном направлении. Величина кластеров серебра на стеклянной подложке составляет 100-120 нм, на полимерной — около 150 нм по максимальной

ному поперечнику. Величина средней шероховатости поверхности пленок для обеих подложек — 3-5 нм. На текстолитовой подложке (рис. 5в) рельеф более сглаженный, однако кластерная структура, хоть и не так явно выраженная, тем не менее просматривается. Разброс размеров кластеров значительный, форма чаще угловатая, чем округлая. Средняя шероховатость порядка 100 нм.

В целом, анализируя АСМ-изображения, следует заметить, что в морфологии пленок можно выделить превышение шероховатости поверхности металлических пленок над шероховатостью текстолитовой подложки. Это характерно для всех трех исследованных металлов. Для пленок на текстолитовых подложках островковое строение характерно при больших толщинах, чем на стеклянных и полимерных подложках. Для пленок на стеклянных подложках характерно соответствие шероховатостей поверхности подложки и пленки. На полимерных подложках аналогичная картина наблюдается для железных и медных пленок. Шероховатость поверхности пленок из серебра на полимерной подложке оказывается значительно меньше шероховатости поверхности самой подложки.

Структурной неоднородности пленок больше всего способствует полимерная подложка, на которой все три металлические пленки имеют четко выраженное кластерное строение. На стеклянной подложке неоднородность структуры медной пленки на наноуровне практически не проявляется и гораздо слабее, чем на полимерной, проявляется у железной пленки. На текстолитовых подложках, несмотря на большую шероховатость, наноструктурные особенности менее выражены, чем на полимерных. Вероятно, судя по характеру электронно-микроскопических изображений, структурные неоднородности металлических пленок на текстолитовых подложках в большей степени определяются на микроуровне.

3. Электронная микроскопия

Известно, что методы сканирующей зондовой микроскопии не дают возможности элементного анализа, а также являются весьма локальными при исследовании поверхности твердых тел. В нашем случае максимальное окно сканирования составляло 7×7 мкм². Для оценки микроуровневого строения пленок и контроля состава поверхности подложек и пленок было проведено исследование на растровом электронном микроскопе с применением энергодисперсионного анализа (рис. 6).

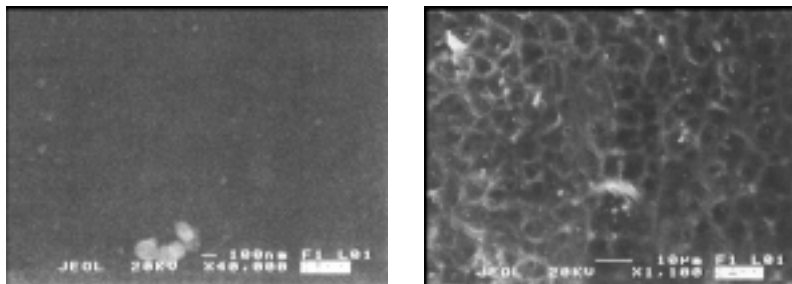


Рис. 6. Изображение пленки серебра на стеклянной (а) и текстолитовой (б) подложках, полученное при помощи растрового электронного микроскопа

В растровом электронном микроскопе пленки на микроуровне преимущественно предстают гладкими, без видимых составляющих их частиц или прочих структурных неоднородностей (рис 6а). Исключение составляют железные и серебряные (рис. 6б) напыления на текстолитовой подложке. Они часто не образуют сплошного покрытия и представляют собой, как правило, сетку с величиной ячеек в единицы (до десятка) микрон. В режиме отраженных электронов удается выявлять участки, в которых вещественная однородность пленки нарушается частицами примесей, располагающихся, как правило, под пленкой, непосредственно на подложке. Морфологически они выглядят по-разному, в зависимости от состава примеси. Это могут быть как кристаллические кластеры микронных и субмикронных размеров, так и образующие окружности и кольца россыпи частиц размерами в несколько десятков микрон. Однако они встречаются локально и в целом на картину морфологии поверхности пленки не влияют.

Основные результаты работы

Методом вакуумного напыления в условиях неглубокого вакуума на различных подложках при комнатной температуре выращены тонкие рентгеноаморфные пленки меди, железа и серебра толщиной 40–60 нм, имеющие кластерное строение.

При помощи методов атомно-силовой и электронной микроскопии показано, что морфология и свойства подложки оказывают значительное влияние не только на морфологию, но и на наностроение металлических пленок. В ходе исследования при одинаковых условиях напыления и равном количестве напыленного материала выявлены отличия в строении пленок, в частности размерах кластеров, характере их контактов друг с другом, величине шероховатости.

На полимерных подложках пленки всех трех металлов состоят из сравнительно наиболее четко выраженных кластеров, величина шеро-

ховатости поверхности пленок сопоставима с таковой для подложки. На стеклянных подложках происходит сглаживание рельефа пленки по сравнению с рельефом подложки (за исключением железных плёнок) вплоть до исчезновения морфологических признаков кластерной наноструктуры для медной пленки. Для текстолитовой подложки характерны развитие рельефа пленок и наличие больших по величине кластеров.

* * *

1. Антонец И.В., Котов Л.Н., Некипелов С.В. и др. Электродинамические свойства тонких металлических пленок с различной толщиной и морфологией поверхности // РЭ. 2004. Т. 49. № 10. С. 1243-1250.
2. Антонец И.В., Котов Л.Н., Некипелов С.В. и др. Особенности наноструктуры и удельной проводимости тонких пленок различных металлов // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 3. С. 24-27.
3. Антонец И.В., Котов Л.Н., Некипелов С.В. и др. Проводящие и отражающие свойства тонких металлических пленок // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 11. С. 102-106.
4. Серов И.Н., Марголин В.И., Потсар Н.А. и др. Исследования наноструктурированных пленок меди методами растровой и атомно-силовой микроскопии // Поверхность. 2004. № 7. С. 31-34.
5. Kaito C., Nakamura H., Kimura S., et. al. The structure of thin Cr film prepared by the vacuum evaporation method // Thin Solid Films. 2000. V. 359. P. 283-287.
6. Berlinger A. Dynamics of gold cluster systems // Appl. Phys A. 1999. V. 68. P. 403-405.
7. Coupeau C., Naud J.F., Cleymand F., et. al. Atomic force microscopy of in situ deformed nickel thin films // Thin Solid Films. 1999. V. 353. P. 194-200.
8. Bruggemann M., Masten A., Wibmann P. Electrical and structural properties of copper films annealed on Si(111) // Thin Solid Films. 2002. V. 406. P. 294-298.
9. Bendavid A., Martin P.J., Wieczorek L. Morphology and optical properties of gold thin films prepared by filtered arc deposition // Thin Solid Films. 1999. V. 354. P. 169-175.
10. Dowben P.A. The metallicity of thin films and overlayers // Surface Science Reports. 2000. V. 40. P. 151-247.
11. Pattabi M., Rao K.M., Sainkar S.R., Sastry M. Structural studies on silver cluster films deposited on softened PVP substrates // Thin Solid Films. 1999. V. 338. P. 40-45.
12. Ge H., Feng C., Ye G., et. al. Growth mechanism and electrical properties of metallic films deposited on silicone oil surfaces // J. Appl. Phys. 1997. V. 82. № 11. P. 5469-5471.
13. Wülfgens H.-W., Friedrich I., Njoroge W.K., et. al. Optical, electrical and structural properties of Al-Ti and Al-Cr thin films // Thin Solid Films. 2001. V. 388. P. 237-244.
14. Бек Г., Гюнтеродт Г.Й. Металлические стекла. М.: Мир, 1983. 454 с.
15. Полухин В.А., Ватолин Н.А. Моделирование аморфных металлов. М.: Наука, 1985. 288 с.
16. Rosenbaum R., Heines A., Palevski A., et al. Metallic transport properties of amorphous nickel-silicon films // J.Phys.: Condens. Matter. 1997. V. 9. P. 5395-5411.

17. Marchal G., Mangin P., Janot C. Amorphous gold-iron alloys above room temperature // Thin Solid Films. 1974. V. 23. P. S17-S19.
18. Андреевко А.С., Никитин С.А. Магнитные свойства аморфных сплавов с переходными 3d-металлами // УФН. 1997. № 6. С. 605.

Л.Н. Котов, Л.С. Носов
Сыктывкарский госуниверситет

О магнитной переориентации однодоменных антиферромагнитных частиц

Представлена нелинейная динамика однодоменных частиц, состоящих из двухподрешеточного антиферромагнетика с кубической анизотропией. Показана возможность изменения ориентации намагниченности подрешеток. Это явление носит пороговый характер и является результатом возбуждения нелинейного АФМР. Представлены стационарные орбиты нелинейных колебаний подрешеток антиферромагнетика.

Одним из альтернативных энергонезависимых носителей информации может быть ансамбль независимых однодоменных ориентированных ферромагнитных частиц [1-5]. Метод считывания информации с такого ансамбля предполагает возбуждение ансамбля маломощным импульсом переменного магнитного поля на частоте ферромагнитного резонанса (ФМР) [2,4,5]. Задача переориентации на резонансных частотах в настоящее время из-за отсутствия экспериментальной базы почти не исследовалась, и подходом к её решению на данном этапе может быть теоретический анализ и численное моделирование поведения намагниченности однодоменной частицы в различных полях. В работе [2] коротко излагается метод решения этой задачи для сферических частиц. В данной работе предлагается исследовать с аналогичной целью однодоменные антиферромагнитные частицы. Исследована задача переориентации вектора антиферромагнетизма однодоменных антиферромагнитных частиц. При этом рассмотрены сферические частицы с кубической анизотропией, которая рассмотрена в приближении одноионного источника.

Постановка задачи

Рассмотрим однодоменные антиферромагнитные частицы с кубической анизотропией в форме сферы. Плотность магнитной энергии частицы представим в виде суммы плотностей энергии обменного поля, энергии кубической анизотропии и зеемановской энергии намагниченностей подрешеток частицы в переменном магнитном поле [6]:

$$U(\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2) = -\frac{\lambda}{2} \mathbf{m}_1 \mathbf{m}_2 + U_a(\mathbf{m}_1) + U_a(\mathbf{m}_2) - M_0(\mathbf{m}_1 + \mathbf{m}_2) \cdot \mathbf{H}, \quad (1)$$

где $U_a(\mathbf{m}) = K_1 \cdot (m_x^2 m_y^2 + m_y^2 m_z^2 + m_x^2 m_z^2) + K_2 \cdot m_x^2 m_y^2 m_z^2$ — плотность энергии кубической анизотропии (решетки считаем эквивалентными),

$K_1 > 0, K_2 < 0$ — первая и вторая константы кубической анизотропии; λ — параметр обменного поля; $\mathbf{H}_\perp = \mathbf{h} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ — внешнее переменное магнитное поле с частотой ω ; $\mathbf{m}_i = \mathbf{M}_i / M_0$ — вектор направляющих косинусов намагниченности \mathbf{M}_i i -той подрешетки, $M_0 = |\mathbf{M}_i|$; оси Ox , Oy и Oz совпадают с главными кристаллографическими осями частицы $[100]$, $[010]$ и $[001]$.

Можно ввести векторы ферромагнетизма и антиферромагнетизма следующим образом: $\mathbf{l} = \mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_2$, $\mathbf{m} = \mathbf{m}_1 + \mathbf{m}_2$. Рассмотрим зависимость плотности энергии анизотропии от ориентации вектора направляющих косинусов намагниченности. На рисунке 2 приведен пример зависимости плотности энергии кубической анизотропии $U_a = U_a(\theta, \varphi)$ от направления вектора направляющих косинусов, где θ и φ соответственно полярный и азимутальный углы сферической системы координат для случая, когда $K_1 > 0$ и $K_2 < 0$.

Особенностями зависимости плотности энергии кубической анизотропии от направления является наличие трех типов точек: положения минимума энергии, положения максимума энергии и седловые точки. Во всех этих положениях эффективное поле анизотропии и намагниченность параллельны с той лишь разницей, что первый тип точек — положением устойчивого равновесия, а положения максимума энергии и седловые точки являются положениями неустойчивого равновесия вектора намагниченности. Эти утверждения справедливы и в том случае, когда рассматриваются обе подрешетки одновременно и вектор ферромагнетизма $\mathbf{m} = 0$, т.е. намагниченности подрешеток антипараллельны и обменная энергия минимальна. Если в ходе колебаний вектора намагниченностей подрешеток одновременно пройдут седловые точки, оставаясь при этом почти антипараллельными, то произойдет магнитная переориентация однодоменной частицы, как это и показано на рисунке 2. Точки минимума энергии при $K_1 > 0$ и $K_2 < 0$ соответствуют кристаллографическим осям типа $[100]$, максимума энергии — осям типа $[111]$, седловые точки — осям типа $[110]$.

При отсутствии внешнего поля вектор антиферромагнетизма \mathbf{l} занимает одно из трех устойчивых положений, соответствующих минимуму энергии: параллельно оси Ox , Oy или Oz . Уравнение движения векторов намагниченностей подрешеток в форме Гильберта после замены переменных может быть записано в виде [6]:

$$\frac{d\mathbf{m}_i}{dt} = -[\mathbf{m}_i \times \mathbf{H}_{\text{eff}}^i] + \alpha \left[\mathbf{m}_i \times \frac{d\mathbf{m}_i}{dt} \right], \quad (2)$$

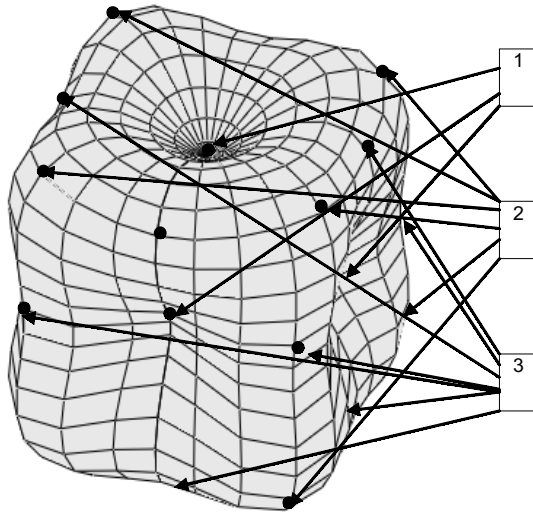


Рис. 1. Зависимость плотности энергии анизотропии от направления.
 Жирными точками обозначены: 1 — положения минимума энергии
 (положения равновесия), 2 — положения максимума энергии,
 3 — седловые точки

где α — безразмерный параметр затухания; $\mathbf{H}_{\text{eff}}^i = -\delta U^i / \delta \mathbf{m}_i$ — приведенное эффективное магнитное поле, действующее на магнитный момент, где $U^i(\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2) = U(\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2) / 2K_1$ — приведенная плотность свободной энергии; $t^* = t \cdot 2\gamma K_1 / M_0$ — приведенное время; $\omega^* = \omega M_0 / 2\gamma K_1$ — приведенная частота; $\mathbf{h}^* = \mathbf{h} \cdot M_0 / 2K_1$ — приведенная амплитуда переменного магнитного поля; γ — гиромагнитное отношение. Такие переменные удобны для численного моделирования. Аналогичный подход был использован в [2].

Результаты численных расчетов

Пусть до включения переменного поля вектор антиферромагнетизма \mathbf{l} был направлен по оси Oy . Переменное поле направлено вдоль оси, которая лежит между Ox и Oy . При определенных значениях амплитуды (начиная с некоторого порогового значения) и частоты переменного поля возможна переориентация вектора антиферромагнетизма \mathbf{l} в положение, перпендикулярное начальному (рис. 2). При всех расчетах использовались следующие параметры: время наблюдения $\Delta t^* = 2$, время действия поля $\tau = 1$, $K_2/K_1 = -0.5$, $M_0^2/2K_1 = 9$, $\lambda/2K_1 = 10^3$.

Численные расчеты производились по методу Рунге-Кутты 7-8 порядка [7]. Основным условием точности метода было сохранение модулей векторов намагниченностей подрешеток.

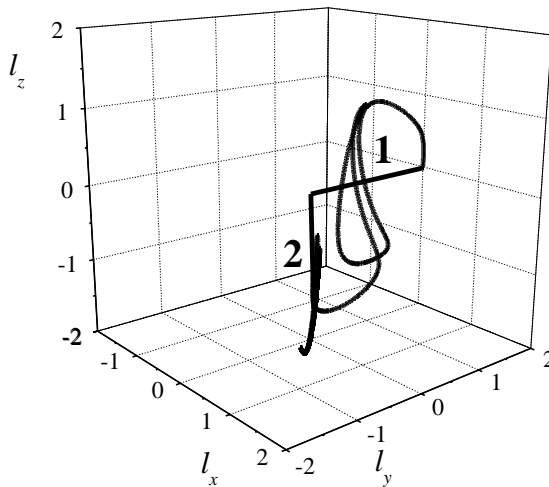


Рис. 2. Траектория движения вектора антиферромагнетизма \mathbf{l} в сферической частице под действием переменного магнитного поля (переориентация из положения 1 в положение 2, перпендикулярное положению 1) при $\omega^* = 67$ и $h^* = 141$. Угол между переменным полем и осью Oy равен $\pi/4$

Как это сделано в работе [2], для ферромагнитных частиц, можно ввести понятие порога переориентации — минимальной амплитуды переменного магнитного поля на данной частоте, при которой проис-

ходит переориентация вектора антиферромагнетизма \mathbf{l} в положение, перпендикулярное начальному положению, которым может быть как положение, параллельное оси Oz , так и положение, параллельное оси Ox . Зависимость порога переориентации вектора антиферромагнетизма \mathbf{l} частицы от частоты (рис. 3) аналогична зависимости порога переориентации ферромагнитной частицы от частоты [2], которая, в свою очередь, аналогична зависимости порога возбуждения нелинейного ФМР от частоты [8]. Таким образом, явление магнитной переориентации антиферромагнитной частицы имеет ярко выраженный пороговый характер с ярко выраженным минимумом и является результатом возбуждения сложных нелинейных колебаний намагниченностей подрешеток однодоменной антиферромагнитной частицы.

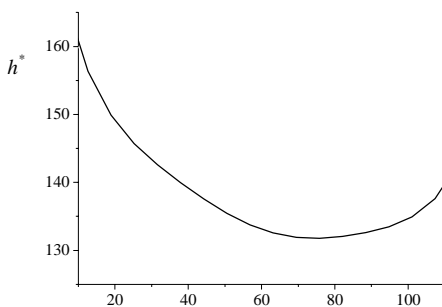


Рис. 3. Зависимость порога переориентации вектора \mathbf{l} в однодоменной антиферромагнитной частице от приведенной частоты при $\alpha = 0.01$.

Угол между переменным полем и осью Oy равен $\pi/4$

Значение порога переориентации зависит и от направления поля. Поэтому была прослежена зависимость порога переориентации от угла между полем и осью Oy . Начиная с малых углов и до $(\mathbf{h} \wedge Oy) \approx \pi/4$ порог переориентации медленно падает, а затем начинает резко возрастать для всех частот переменного поля (рис. 4).

При угле $(\mathbf{h} \wedge Oy) \approx \pi/2$ переориентация не наблюдалась (рис. 5), хотя колебания векторов намагниченностей подрешеток могли пройти седловую точку. Это связано с тем, что неколлинеарное внешнему полю положение для антиферромагнетика является энергетически более выгодным, чем коллинеарное, в отличие от ферромагнетика. К тому же, как видно из траектории, параллельные полю составляющие векторов направляющих косинусов двигались синхронно и были равны, из-за чего с

каждым отклонением от положения равновесия росло обменное поле, затрудняющее отклонение от положения равновесия одновременно обеим подрешеткам. При этом вектор антиферромагнетизма колеблется строго перпендикулярно внешнему переменному магнитному полю.

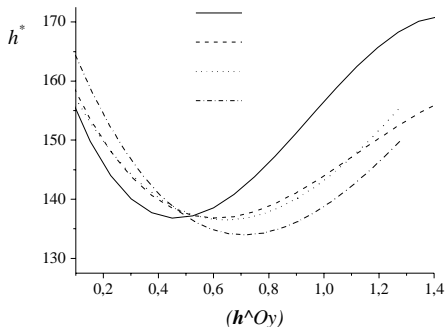


Рис. 4. Зависимость порога переориентации вектора \mathbf{l} в однодоменной антиферромагнитной частице от угла между переменным магнитным полем и осью Oy при различных частотах при $\alpha = 0.01$

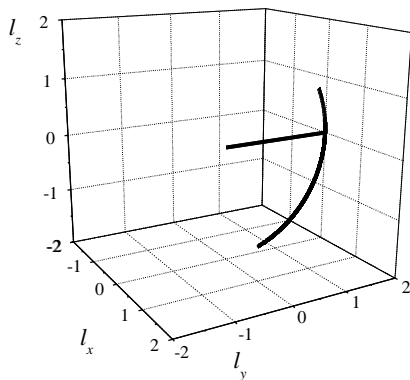


Рис. 5. Траектория движения вектора антиферромагнетизма \mathbf{l} сферической частицы под действием переменного магнитного поля при $\omega = 67$ и $h^* = 141$. Угол между переменным полем и осью Oy равен $\pi/2$. Прямой линией показано начальное и конечное положение вектора антиферромагнетизма

Некоторые особенности нелинейной динамики магнитных колебаний

Нелинейная динамика намагниченностей подрешеток под действием допорогового переменного поля представляет самостоятельный интерес. Как видно из рисунка 6, в ходе колебаний намагниченностей возможна генерация второй (проекция траектории типа «восьмерки») и третьей (проекция траектории с двумя точками пересечения) гармоник в ходе колебаний намагниченностей подрешеток. Однако из-за сложной динамики стационарных орбит практически невозможно аналитически определить зависимости порога переориентации от различных параметров: частоты, ориентации поля, анизотропии и т.п.

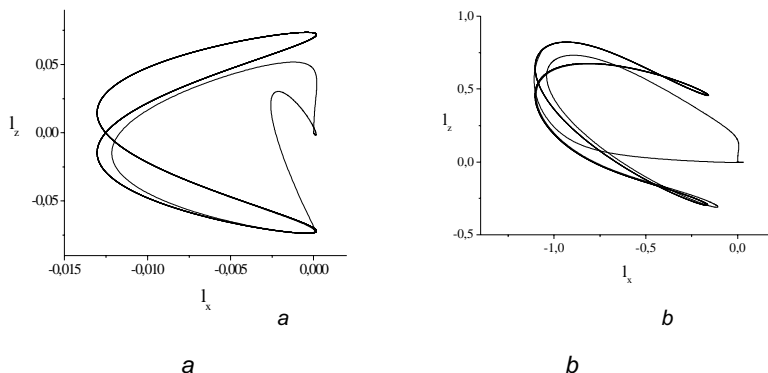


Рис. 6. Проекция траектории движения вектора антиферромагнетизма \mathbf{I} сферической частицы под действием переменного магнитного поля на плоскость xOz при $\omega^* = 67$ и $h^* = 14$ (а), $\omega^* = 40$ и $h^* = 131$ (б). Угол между переменным полем и осью Oy равен $\pi/4$

В работе рассмотрена нелинейная динамика магнитной системы однодоменной антиферромагнитной частицы. Показано, что при определенных значениях частоты и амплитуды импульса переменного магнитного поля, действующего на частицу, наблюдается переориентация вектора антиферромагнетизма в положение, перпендикулярное начальному положению вектора антиферромагнетизма частицы. Определены характерные зависимости порога переориентации от частоты и ориентации переменного поля. Явление магнитной переориентации однодоменной антиферромагнитной частицы носит пороговый характер и может быть использовано для записи информации по частоте.

Приведены некоторые особенности нелинейной динамики намагниченностей в допороговом случае, которые требуют дальнейших исследований. Также дальнейших исследований требует теоретическое изучение магнитной переориентации антиферромагнетиков с различными типами магнитной анизотропии, когда учитываются и перекрестные члены [6].

* * *

1. Kotov L.N., Asadullin F.F., Asadullin F.F. The response of the Single-Domain Ferrite Particles Assemley // Proceeding International Forum on Wave Electronics and Its Applications. St.Peterburg, 2000. P.196-198.
2. Котов Л.Н., Носов Л.С. Переориентация вектора намагниченности в однодоменной частице импульсом высокочастотного поля // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 20. С. 38-42.
3. Голдин Б.А., Котов Л.Н., Зарембо Л.К. и др. Спин-фононные взаимодействия в кристаллах (ферритах). Л.: Наука, 1991. 148 с.
4. Котов Л.Н., Шапоров В.Н. Время сохранения и механизм памяти в порошках ферритов // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 19. С. 76-80.
5. Котов Л.Н., Носов Л.С. О возможности использования явления ФМР для магнитной записи информации // Сб. тр. XVIII Междун. школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники (НМММ)». М., 2002. С. 734-736.
6. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 464 с.
7. Бордовицина Т.В. Современные численные методы в задачах небесной механики. М.: Наука, 1984. 136 с.
8. Моносов Я.А. Нелинейный ферромагнитный резонанс. М.: Наука, 1971. 210 с.

**Ю.Е. Калинин, Л.Н. Котов, С.Н. Петрунёв,
А.В. Ситников, И.В. Антонец, А.И. Сметанин**
Сыктывкарский госуниверситет

Особенности проводящих и отражающих свойств композитных плёнок $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$

Исследованы СВЧ проводящие и отражающие свойства композитных плёнок составов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$. При концентрациях металлической фазы $X < 45\%$ обнаружен скачок коэффициента отражения СВЧ волн для плёнок с малыми концентрациями $X < 48\%$ в интервале частот 20-25 ГГц. Этот скачок объяснён на основе частотной зависимости комплексной проводимости, которая связана с наноструктурой композитных плёнок.

Прогресс в микроэлектронике, связанный с развитием тонкоплёночных технологий, требует расширения исследований свойств плёнок с различной структурой, в том числе и электродинамических свойств в различных диапазонах частот. Исследованию проводимости и электродинамических свойств композитных пленок в окрестности порога перколяции посвящено значительное количество работ [1-4], где изучается отражение, поглощение оптических и инфракрасных волн такими пленками. Большой интерес к таким исследованиям вызван тем, что для них может наблюдаться аномальный характер отражения и поглощения композитными плёнками, например, при изменении частоты [3, 4]. Для таких волн размер структурных неоднородностей в плёнке порядка длины волны и соответственно распределение поля волны внутри плёнки неоднородно. Для таких волн могут наблюдаться резонансные и релаксационные размерные эффекты. Исследованию электродинамических свойств сантиметрового диапазона, для которого длина волны значительно превышает толщину плёнок и размер структурных неоднородностей, уделено значительно меньше внимания [5-6]. Тем не менее именно эта область интересна применением композитных пленок в разнообразных СВЧ устройствах обработки и передачи информации. Поэтому данная работа посвящена исследованию отражения сантиметровых электромагнитных волн от частоты при различных соотношениях концентраций металлической и диэлектрической фаз плёнок состава $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$, а также выявлению связи полученных характеристик с наноструктурой плёнок и с проводящими свойствами.

Характеристика исследуемых плёнок

Для исследования отражательных СВЧ свойств были получены пленки составов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ (X изменялось от 31 до 64 %) толщиной d 2,2 ÷ 6 мкм. Толщина и химический состав плёнок определялись с помощью электронного растрового сканирующего микроскопа

JSM-6400. Методика получения композитных плёнок, а также наноструктура аналогичных плёнок, полученная с использованием просвечивающей рентгеновской спектроскопии, описана в работе [7]. Приведённые в работе [7] электронограммы свидетельствуют о наличии в композитных плёнках металлических гранул $Co_{45}Fe_{45}Zr_{10}$, которые окружены диэлектрическими прослойками из Al_2O_3 .

Зависимости удельного электрического сопротивления ρ , измеренные на постоянном токе при комнатной температуре, от концентрации металлической фазы $Co_{45}Fe_{45}Zr_{10}$ показаны на рисунке 1. При изменении величины X от 28 до 65 % электрическая проводимость исследуемых систем изменяется более чем на 2 порядка. Для композитных плёнок после термообработки наблюдается заметное разделение электрической проводимости при $X \approx 41$ ат. % на диэлектрическую и металлическую области, что характерно для перколяционных систем [8]. При этом термообработка композитов приводит к увеличению электрического сопротивления для составов, находящихся до порога протекания, и к его уменьшению — за порогом протекания. Увеличение удельного электрического сопротивления плёнок, находящихся до порога перколяции, связано со структурной релаксацией аморфной диэлектрической матрицы и с увеличением расстояния между гранулами. Дальнейшее уменьшение электрического сопротивления композитных плёнок уже после порога перколяции ($X \geq 41\%$) связано со структурной релаксацией бесконечной сетки гранул аморфной металлической фазы [8].

Рис.1. Зависимости удельного электрического сопротивления гранулированных композитов $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$ от концентрации металлической фазы

Методика измерений СВЧ отражения

Коэффициент отражения СВЧ сигнала от композитных плёнок измерялся при нормальном падении волны [9,10]. Измерения проводились в диапазоне частот 8-25 ГГц. Исследуемая плёнка помещалась в прямоугольные волноводы разными сечениями в зависимости от длины волны (от 10x24 до 3x8 мм²) перпендикулярно его продольной оси. Плёнка перекрывала все сечение волновода. На другом конце волновода позади плёнки находилась согласованная нагрузка (рис. 2). Волновод подключался к панорамному измерителю комплексных коэффициентов передачи, который включал в себя генератор качающейся частоты (ГКЧ — 61, 65, 68), индикатор КСВН и модуль ослабления (ЯСР — 67), а также волноводный комплект рефлектометров. Исходный сигнал от генератора СВЧ разветвлялся на два канала, один из которых использовался в качестве опорного и сразу после детектирования поступал на индикатор, а другой подключался к волноводу с исследуемым образцом. Отраженная волна возбуждала ЭДС в приёмном устройстве. Сигнал далее детектировался и поступал на индикатор. Детектирование в обоих случаях осуществлялось таким образом, что выходной сигнал был пропорционален напряженности поля волны СВЧ. Благодаря такому включению на индикаторе можно сравнивать амплитуды напряженности поля падающей и отраженной волны, по отношению которых и определялся коэффициент отражения R

$$R = \frac{K - 1}{K + 1} = \frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}}, \quad (1)$$

где K — коэффициент стоячих волн (определялся по шкале индикатора), $E_{\text{пад}}$ и $E_{\text{отр}}$ — амплитуды падающей и отраженной волн соответственно.

Рис. 2. Блок-схема установки для измерения коэффициента стоячей волны:

- I — генератор качающейся частоты (ГКЧ), II — индикатор,
- 1 — коаксиально-волноводный переход, 2 и 3 — направленные детекторы падающей и отраженной волн, 4 — согласованная нагрузка, 5 — соединительный кабель, 6 — исследуемый образец, 7 — выходы АРМ индикатора и ГКЧ, 8 и 9 — входы для приёма падающей и отраженной волн,
- 10 и 11 — выход и вход ГКЧ, 12 — вход индикатора

Результаты по СВЧ отражению

На рисунке 3 показаны экспериментальные зависимости коэффициента отражения R СВЧ-волн на частотах 10, 16, 22 ГГц для композитных плёнок от концентрации металлической фазы X . Коэффициент R сначала незначительно уменьшается с ростом процентного содержания металлической фазы от $X=32$ до 42. При концентрациях $X \approx 42 \div 48$ коэффициент отражения R , как и статическая проводимость $\sigma_0 = \rho^{-1}$, резко увеличивается и достигает максимального значения.

Рис.3. Зависимости коэффициента отражения R для композитных плёнок $(Co_{40}Fe_{40}Zr_{20})_X(Al_2O_3)_{100-X}$ от концентрации металлической фазы X .
Частоты СВЧ-волн (в ГГц): 1 — 10, 2 — 16, 3 — 22

На рисунке 4 показаны экспериментальные частотные зависимости коэффициента отражения СВЧ-волн для композитных плёнок состава $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_X(Al_2O_3)_{100-X}$ при разных концентрациях металлической фазы X . Как видно из рисунка 4, коэффициент отражения R слабо меняется в интервале частот 8-18 ГГц для всех плёнок. В то же время в интервале частот 19,7-25 ГГц для частотной зависимости коэффициента отражения $R(f)$ наблюдается скачок для плёнок с малыми концентрациями $X < 48\%$ от 0,56-0,75 до 0,8-0,86. Для плёнок с большим процентным содержанием X металлической фазы скачок $R(f)$ размывается и исчезает.

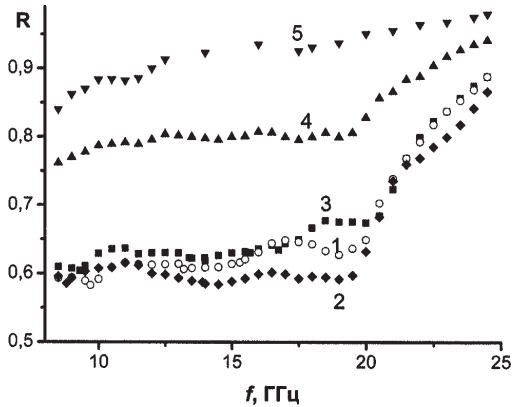


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента отражения СВЧ-волн R для плёнок $(Co_{45}Fe_{10}Zr_{3})(Al_2O_3)_{100-X}$ при концентрации металлической фазы X (в %): 1-31, 2-35, 3 — 39, 4 — 45, 5 — 48

Обсуждение результатов

Существование сильной частотной зависимости только для плёнок с малыми концентрациями X , соответствующих доперколяционной области, свидетельствует о том, что эта зависимость может быть связана только с наличием диэлектрических слоёв между металлическими гранулами и описана частотной зависимостью комплексной проводимости в СВЧ диапазоне. Для описания СВЧ проводящих свойств композитных плёнок необходимо выбрать эквивалентную электрическую схему. С учётом того, что плёнки состоят из металлических гранул и диэлектрических слоёв, электрическая схема одного наноструктурного элемента может быть представлена в виде цепочки, содержащей ёмкость C и сопротивление R_1 (рис. 5). Наличие конечной проводимости на постоянном токе может быть учтено сопротивлением R_2 , параллельным к этой цепочке, которое определяется статическим сопротивлением плёнки. Выражение для модуля комплексной проводимости плёнки с учётом эквивалентной схемы может быть записано в следующем виде:

$$|Y(f)| = \frac{\{[(R_1 R_2 + R_1^2 + (2\pi f C)^{-2})(2\pi f C)]^2 + R_2^2\}^{1/2}}{(R_1^2 + (2\pi f C)^{-2})(R_2 2\pi f C)}, \quad (2)$$

где $R_1 \approx 2\rho_m h/(ld)$ — сопротивление 2-х металлических гранул с поперечными размерами h (длиной l и толщиной d), между которыми находится диэлектрическая прослойка, $\rho_m \approx \rho S_m / S$ - удельное сопротивление

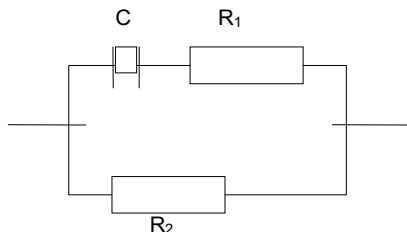


Рис. 5. Эквивалентная электрическая схема наноструктурной единицы плёнки

ние металлических гранул, S_m и S — площади поперечного сечения плёнки без и с учётом диэлектрической фазы, $R_2 \approx \rho_m l / (hd)$ — продольное сопротивление гранулы длиной l , имеющей контакт с соседней гранулой, C — ёмкость конденсатора, состоящего из двух соседних металлических гранул и диэлектрического слоя между ними. Сопротивление R_1 можно выразить через сопротивление R_2 , удельное сопротивление и толщину плёнки $R_1 \approx 2 \rho_m^2 / R_2 d^2$ (численные значения сопротивлений приведены в табл. 1). С учётом того, что для времени релаксации электронов в металлах выполняется неравенство $\tau \ll T$, где T — период колебаний электронов в плёнке при возбуждении их СВЧ полем, можно считать, что значение ρ_m слабо зависит от частоты и определяется в основном статическим удельным сопротивлением. Значения удельного статического сопротивления ρ для разных концентраций металлической фазы χ приведены на рисунке 1. Для оценки ёмкости элемента наноструктуры можно воспользоваться формулой плоского конденсатора

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon l d / h_d, \quad (3)$$

где ε_0 — электрическая постоянная, ε и h_d — диэлектрическая проницаемость и ширина слоя, l — длина металлической гранулы. Оценка ёмкости C для исследуемой наноструктуры в плёнках даёт следующие значения $C \approx (1,2 \div 4) \cdot 10^{-14} \text{ Ф}$ (при расчётах использованы следующие параметры структуры плёнок: $l \approx 5 \div 20 \text{ нм}$, $h_d \approx 0,3 \div 2 \text{ нм}$, $\varepsilon \approx 7$, $d \approx 2 \div 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$).

Частотные зависимости модуля комплексной проводимости для разных концентраций металлической фазы χ композитных плёнок, рассчитанные на основе формулы (2), приведены на рисунке 6. При расчётах модуля комплексной проводимости использованы электрические характеристики наноструктурного элемента плёнок для разных

концентраций металлической фазы χ , которые приведены в таблице 1. Из рисунка 6 видно, что для плёнок с небольшим содержанием металлической фазы ($\chi < 35\%$) при частотах $f = \omega/2\pi \leq 7\text{ГГц}$ и $f \geq 50\text{ГГц}$ проводимость слабо меняется с частотой.

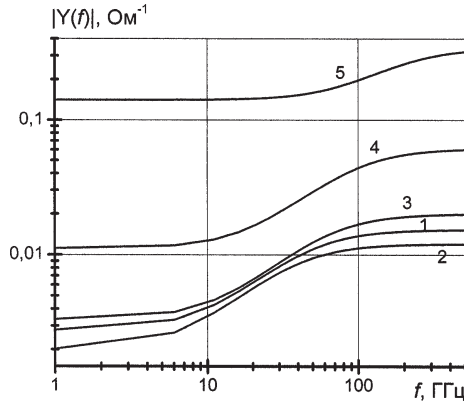


Рис. 6. Частотные зависимости модуля комплексной проводимости для плёнок $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ при концентрациях χ (ат.%): 1-31, 2-35, 3-39, 4-45, 5-48

Сильное изменение проводимости для плёнок наблюдается в интервале частот ($f = 20 \div 40\text{ГГц}$). Для плёнок с большей концентрацией металлической фазы ($\chi > 45\%$) амплитуда скачка проводимости значительно уменьшается по величине и смещается в область более высоких частот. Это связано с тем, что за счёт роста концентрации металлической фазы и перколяционных процессов в плёнке уменьшается общее количество контактов между кластерами и диэлектрическими прослойками и, как следствие, возникает значительное уменьшение статического удельного сопротивления.

Коэффициент отражения по напряжённости поля волны на частоте $f = \omega/2\pi$ от проводящей тонкой пленки, имеющей толщину d и проводимость $\sigma(f) \approx |Y(f)/d|$, может быть описан формулой Каплана [11]:

$$R = \{1 + 2/\sigma(f)\eta_0 d\}^{-1}, \quad (4)$$

где $\eta_0 = 120\pi$ - импеданс свободного пространства. Как следует из формулы (4), частотная зависимость коэффициента отражения $R(f) \sim \sigma(f)$ и его поведение будет аналогично зависимостям $|Y(f)|$, приведённым на рисунке 6. Из сравнения рисунка 4 и рисунка 6 видно, что кривые

$|Y(f)|$ хорошо коррелируют с экспериментальными данными для коэффициента отражения $R(f)$ в приведённом частотном диапазоне. Следовательно, обнаруженный эффект может быть объяснён на основе частотной зависимости комплексной проводимости металл-диэлектрических плёнок. Эта зависимость возникает благодаря наличию ёмкостного и активного сопротивлений в плёнках, образуемых наноструктурными элементами. Некоторые различия в поведении частотных зависимостей модуля комплексной проводимости $|Y(f)|$ и коэффициента отражения $R(f)$, например, в ширине скачка, возможно, связаны с разбросом размеров наноструктурной единицы в плёнке, а также наличием явления самоиндукции и не учитывались здесь при расчётах модуля комплексной проводимости $|Y(f)|$, а также частичным вхождением диэлектрической фазы в металлические гранулы.

Таким образом, в данной работе исследовано отражение сантиметровых электромагнитных волн в зависимости от частоты и концентраций металлической и диэлектрической фаз в композитных плёнках состава $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$. Выявлена сильная зависимость коэффициента отражения СВЧ-волн от концентраций металлической фазы в области интенсивных процессов перколяции металлических гранул в плёнках. Обнаружен скачок коэффициента отражения СВЧ-волн в интервале частот 19-25 ГГц для плёнок с небольшим содержанием металлической фазы, которые характеризуются доперколяционной наноструктурой. На основе этого факта можно сделать вывод, что метод отражения СВЧ-волн от гранулированных плёнок может быть одним из чувствительных методов определения области перколяционных переходов в плёнках.

Результаты исследований отражения СВЧ-волн объяснены на основе частотной зависимости модуля комплексной проводимости металл-диэлектрических плёнок. Выражение для модуля проводимости получено благодаря введению эквивалентной электрической схемы наноструктурной единицы плёнки. В схеме учтены активное и ёмкостное сопротивления металлических гранул и диэлектрических прослоек. Расчёты частотных зависимостей модуля комплексной проводимости позволили выявить наличие релаксации проводимости в СВЧ диапазоне для исследованных плёнок. Наблюдаемый скачок коэффициента отражения в интервале частот 19-25 ГГц связан с релаксацией комплексной проводимости и обусловлен особенностями наноструктуры композитных плёнок*.

* Авторы выражают глубокую признательность В.И. Филиппову за помощь в определении состава и толщины плёнок.

* * *

1. Абелес Ф. Оптические свойства металлических пленок // Физика тонких пленок. Т. 6. С. 171-227.
2. Технология тонких пленок: Справ. / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнка. М., 1977. Т. 1, 2. С. 768.
3. Бланк А.Я., Касумов Ф.К., Шаршанов А.Я. Поглощение электромагнитного излучения в слоистой структуре металл-диэлектрик // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 12. С. 2128-2137.
4. Драченко А.Н., Юрасов А.Н., Быков И.В. и др. Оптические свойства магнитных квази-2D нанокompозитов в ИК области спектра // ФТТ. 2001. Т. 43. Вып.5. С. 897-899.
5. Казанцева Н.Е., Пономаренко А.Т., Шевченко В.Г. и др. Свойства и перспективы применения гранулированных ферромагнетиков в области СВЧ // Физика и химия обработки материалов. 2002. № 1. С. 5-11.
6. Lutsev L.V., Kazantseva N.T., Tchmutin I.A., Rynkina N.G., Kalinin Yu.E., Sitnikoff A.V. Dielectric and magnetic losses of microware electromagnetic radiation in granular structures with ferromagnetic nanoparticles // J. Physics: Cond. Matter, 2002, V. 14. P. 1-15.
7. Калинин Ю.Е., Пономаренко А.Т., Ситников А.В. и др. Гранулированные нанокompозиты металл-диэлектрик с аморфной структурой // Физика и химия обработки материалов. 2001. № 5. С. 14-20.
8. Калинин Ю.Е., Ремизов А.Н., Ситников А.В. Электрические свойства аморфных нанокompозитов $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{1-x}$ // ФТТ. 2004. Т. 46. Вып. 11. С. 2076-2082.
9. Антонец И.В., Котов Л.Н., Некипелов С.В. и др. Проводящие и отражающие свойства тонких металлических плёнок // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 10. С. 102-106.
10. Антонец И.В., Котов Л.Н., Некипелов С.В. и др. Проводящие и отражающие свойства тонких металлических плёнок с различной толщиной и морфологией поверхности // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 10. С. 1224.
11. Каплан А.Е. Об отражательной способности металлических пленок в СВЧ- и радиодиапазоне // Радиотехника и электроника. 1964. № 10. С. 1781-1787.

Ю.В. Гольчевский, Л.Н. Котов, А.М. Уляшев
Сыктывкарский госуниверситет

Влияние параметра диссипации на магнитные спектры и время релаксации

В работе приведены исследования поведения параметра диссипации в зависимости от частоты. Предложен метод расчета времен релаксации монокристаллов и поликристаллов с учетом зависимости параметра диссипации от частоты.

1. Параметр диссипации и процессы релаксации спиновой системы

Процессы релаксации делятся на спин-спиновые и спин-решеточные, описанные в работе [1]. Спин-спиновые процессы приводят к перераспределению энергии внутри магнитной системы [2]. Спин-спиновые процессы релаксации подразделяются на собственные, которые происходят в идеальных кристаллах, и процессы, обусловленные неоднородностями, которые можно трактовать как рассеяние магнонов на дефектах. Спин-решеточные обеспечивают передачу энергии из магнитной системы в другие: решетку, свободные носители заряда, ядерную магнитную систему [2,3]. Спин-решеточные процессы подразделяют на прямые, при которых происходит уничтожение магнонов и рождение фононов, и косвенные — когда энергия передается из магнитной системы в решетку через другие системы [2].

Релаксационные процессы спиновой системы характеризуются временем релаксации τ , за которое компонента вектора намагниченности \mathbf{M} уменьшается в e раз. Это одна из важнейших характеристик ферромагнитных материалов, влияющая на их частотные свойства: изменяет угол наклона частотных зависимостей проницаемости, ширину области абсорбции и т.д. Время релаксации связано с частотой релаксации f_c :

$$\tau = (f_c)^{-1}. \quad (1)$$

Параметр диссипации α , входящий в уравнение Гильберта [4], часто связывают с резонансной частотой колебаний вектора намагниченности f_0 при отсутствии потерь и частотой релаксации процессов вращения f_c выражением [5]:

$$\alpha = f_c / f_0. \quad (2)$$

С учетом этой формулы время релаксации может быть записано как

$$\tau = \frac{1}{\alpha \cdot f_0}. \quad (3)$$

Существует несколько методов нахождения τ . Наиболее распространенный метод определения времени релаксации τ — по ширине пика частотной зависимости мнимой компоненты проницаемости μ'' на полувысоте [6-8]:

$$\tau \approx (\Delta f)^{-1}, \quad (4)$$

где Δf — ширина пика на половине максимального значения мнимой компоненты магнитной проницаемости μ'' (рис. 1). Как правило, этот метод используется для намагниченных до насыщения магнетиков (однодоменных кристаллов и поликристаллов). В [9] было установлено, что с ростом α увеличивается ширина пика поглощения μ'' , определены некоторые механизмы, обуславливающие потери и увеличение значения α , а также и конечные размеры ширины пика поглощения: а) потери, вызванные вихревыми токами; б) происходящие в ферритах перескоки электронов между ионами Fe^{2+} и Fe^{3+} , приводящие к изменению ориентации спонтанной намагниченности; в) колебания решетки, вызванные прецессией при наличии магнитной анизотропии; г) возникновение высших мод с высокой магнитостатической и обменной энергией.

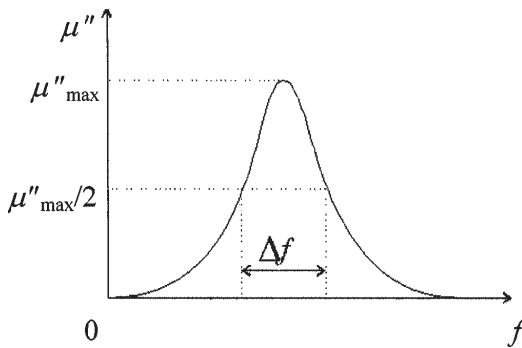


Рис. 1. Определение времени релаксации по ширине пика частотной зависимости мнимой компоненты проницаемости μ''

Экспериментально проще поддерживать частоту f постоянной, а изменять статическое магнитное поле H_0 , получая таким образом зависимость $\mu''(H_0)$. Ширина резонансной линии тогда будет составлять [9]:

$$\Delta f = \gamma' \Delta H_0, \quad (5)$$

где $\gamma' = 2.8 \text{ МГц/Э}$. Значение времени спиновой релаксации находят, используя формулу (5). Формулы (4) и (5) эквивалентны в том случае,

когда измерения проводятся на монодоменных образцах, т.к. доменная структура образца существенно меняется при изменении внешнего поля, что приводит к изменению магнитных спектров образца [10,11]. Экспериментальная оценка времени релаксации обычно производится по магнитному спектру материала, что подразумевает использование большого числа экспериментальных данных в широком диапазоне частот [6]. Предпринимались попытки оценить время релаксации и по другим характеристикам ферритов. В работе [12] время релаксации найдено из расчетов спин-спинового и спин-решеточного взаимодействия. Но такой метод дает хорошую оценку для металлов, а для ферритов, особенно поликристаллических, не дает высокой точности в связи с преобладанием в них релаксации на различных неоднородностях, что было показано в работах [13-15]. Из данных работ следует, что при увеличении энергии, передаваемой в магнитную подсистему, время релаксации также увеличивается. Возможно, в определенных амплитудных диапазонах данная закономерность характерна для всех ферритов со структурой шпинели. При больших амплитудах переменного магнитного поля возвращение в положение равновесия вектора намагниченности может задерживаться, что обусловлено тем, что поликристалл обладает сильными нарушениями внутренней структуры. В работе [16] предлагаются достаточно точные формулы для расчета времен релаксации, но они достаточно сложны и могут использоваться только для однодоменных частиц.

Значения времен релаксации можно найти, зная значение параметра α , и используя формулу (4), которую можно оценить несколькими способами [5]: во-первых, зная частоту максимума абсорбции f_a и частоту f_x , при которой действительная компонента магнитной восприимчивости $\chi' = 0$:

$$\alpha = \sqrt{\frac{f_x^2 - f_a^2}{f_x^2 + f_a^2}} \quad (6)$$

во-вторых, по ширине кривой поглощения или максимуму μ'' :

$$\alpha = \frac{2}{3} \gamma \frac{M_s}{f_a \mu''_{\max}}, \quad (7)$$

или из решения уравнения, которое приведено в работе Л.А. Фоменко [5]:

$$\frac{d(\mu'-1)}{df} \frac{2}{3} \frac{f_x^2}{\gamma M_s} = \frac{\sqrt{(1+\alpha^2)^3}}{\alpha^2(1-\alpha^2)}, \quad (8)$$

где γ — гиромагнитное отношение, M_s — намагниченность насыщения. Все же при определении времени релаксации для большинства образцов самым точным методом остается стандартный метод. Однако его точность определяется тем, как зависит время релаксации от величины внутренних полей и наличия доменной структуры. Для малых внешних постоянных полей, в которых образец характеризуется многодоменной структурой, время спин-спиновой релаксации может принимать совсем другие значения [6] из-за наличия магнитных неоднородностей и возникновения дополнительных потерь, обусловленных колебаниями доменных стенок в переменных магнитных полях. В малых постоянных полях одновременное колебание вектора намагниченности в доменах и колебание доменных стенок должно приводить к перенормировке времен спиновой релаксации [14,17].

2. Время релаксации и распределение вектора намагниченности в доменах по временам релаксации

Во многих работах [2, 7, 18, 19], посвященных расчетам магнитных спектров, диссипативный параметр α , входящий в формулы для уравнений, описывающих движение вектора намагниченности, принимается постоянным во всем частотном диапазоне. Однако если учесть, что параметр $\alpha = f_c / f_0$, то очевидно, что во всем диапазоне частот эта величина не может оставаться постоянной в силу того, что зависимость $f_c(f_0)$, по крайней мере, в граничных точках $f_0 \rightarrow 0$ и $f_0 \rightarrow \infty$ является нелинейной. Поэтому реальное поведение этого параметра при изменении частоты требует более подробного изучения.

Магнетики в нулевых постоянных магнитных полях имеют доменную структуру, поэтому при слабых взаимодействиях соседних доменов (что характерно в первую очередь для поликристаллических магнетиков) может возникать распределение времён релаксации колебаний вектора намагниченности по резонансным частотам. Для нахождения такого распределения введем функцию распределения по резонансным частотам ФМР $\varphi(f_0)$ и предположим, что параметр диссипации α зависит от частоты резонанса.

3. Распределение резонансных частот магнитных моментов в монокристаллических и поликристаллических ферритах

Монокристаллы в отличие от поликристаллов обладают меньшими нарушениями внутренней структуры и, следовательно, они в меньшей степени оказывают влияние на магнитную структуру, что характеризуется сильным взаимодействием доменов. Следовательно, время релаксации τ для всех доменов в монокристалле будет слабо отличаться друг от друга. Небольшой разброс будет обуславливаться размерами и фор-

мой образца (т.е. зависит от того, сколько краевых доменов имеется в данном образце) и в меньшей степени — тепловыми колебаниями и различием значения внутреннего поля в них [2].

В поликристалле также можно ввести понятие времени релаксации τ , хотя оно будет иметь уже несколько другой физический смысл, чем для монокристалла. Оно будет усредненной величиной из набора времен релаксаций. Это происходит из-за уменьшения зависимости вращения вектора намагниченности в соседних зернах вследствие задержек на различных дефектах и неоднородностях и меньшего взаимодействия доменов соседних зерен поликристалла. В этом случае возвращение в положение равновесия вектора намагниченности при больших амплитудах задерживается, что может приводить к увеличению времен релаксации [20]. Большая неоднородность полей и внутренней структуры приводит к тому, что соседние магнитные моменты оказываются в неодинаковых условиях, что увеличивает разброс по временам релаксации и определяет их большую дисперсию, т.е. существует набор времен релаксации. Это приводит к увеличению области дисперсии, соответствующей области ФМР. В случае малых отклонений все частицы поликристалла находятся примерно в равных условиях, т.к. поля практически одинаковы в центре, и в каждой из них время релаксации близко ко времени релаксации монокристалла, а среднее время релаксации поликристалла соответственно не слишком отличается от времени монокристалла.

Резонансная частота f_0 и частота релаксации f_c зависят от эффективного поля, действующего на магнитный момент в частице поликристалла [19]. В связи с этим в формулы для компонент проницаемости многодоменного ферромагнетика, обусловленных колебаниями вектора намагниченности, вводят функцию распределения колебаний вектора намагниченности в доменах по резонансным частотам $\varphi(f_0)$ [29]:

$$\mu'_{rot} = 1 + 4\pi \int_{f_{0\min}}^{f_{0\max}} \gamma M_s f_0 \frac{f_0^2 - (1 - \alpha^2) f^2}{[f_0^2 - (1 + \alpha^2) f^2]^2 + 4\alpha^2 f^2 f_0^2} \cdot \varphi(f_0) df_0; \quad (9)$$

$$\mu''_{rot} = \int_{f_{0\min}}^{f_{0\max}} 4\pi \alpha \gamma M_s f \frac{f_0^2 + (1 + \alpha^2) f^2}{[f_0^2 - (1 + \alpha^2) f^2]^2 + 4\alpha^2 f^2 f_0^2} \cdot \varphi(f_0) df_0, \quad (10)$$

где $f_{0\min}$ и $f_{0\max}$ — минимальная и максимальная резонансные частоты ферромагнитного резонанса (ФМР).

В данной работе в качестве функции $\varphi(f_0)$ в зернах поликристалла взята функция, описываемая выражением, хорошо аппроксимирующая экспериментальные кривые:

$$\varphi(f_0) = A \exp(- (f_0 - f_{0\min})^2 / B^2), \quad (11)$$

где коэффициент B находится из условия минимального расхождения расчетных кривых с экспериментальными данными, а A — из условия

нормировки
$$\int_{f_{0\min}}^{f_{0\max}} \varphi(f_0) df_0 = 1.$$

При аппроксимации экспериментальных спектров были использованы и другие функции (например, $\varphi(f_0) = A f_0 \exp(- (f_0 - f_{0\min})^2 / B^2)$, максвелловская $\varphi(f_0) = A f_0^2 \exp(- (f_0 - f_{0\min})^2 / B^2)$, линейная функция $\varphi(f_0) = A - B \cdot f_0$ и др. Однако при расчёте спектров было выяснено, что функция вида (11) лучше описывает экспериментальные данные (сумма среднеквадратичных отклонений меньше примерно на 18-22% по сравнению с другими, рассмотренными выражениями для функции $\varphi(f_0)$).

Магнитные моменты в доменах монокристалла при резонансе возвращаются в положение равновесия за примерно одинаковое время независимо от амплитуды отклонения. Для таких образцов оптимальная функция распределения будет иметь следующий вид (рис. 2):

$$\varphi_m(f_0) = A_m \exp(- (f_0 - f_{01})^2 / B_m^2), \quad (12)$$

где A_m , B_m — множитель и дисперсия для монокристалла. Отличие функции распределения резонансных частот для поликристаллов от монокристаллов состоит в том, что $f_{0\min}$ близка к частоте резонанса в полях магнито-кристаллографической анизотропии монокристалла.

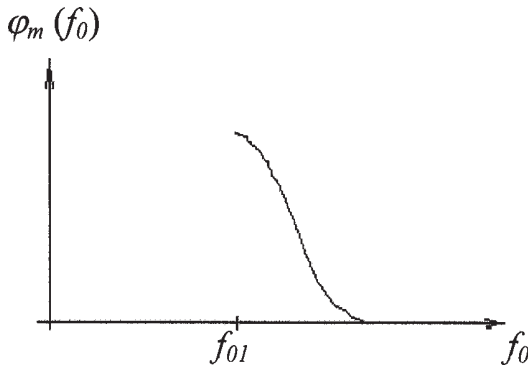


Рис. 2. Функция распределения резонансных частот для монокристаллов

4. Зависимость параметра диссипации от частоты резонанса

В данной работе время релаксации τ находится через параметр диссипации α по формуле (3). На характер магнитных спектров, обусловленных колебанием вектора намагниченности в доменах, оказывают большое влияние внутренние магнитные поля, обладающие различной природой. Обменное взаимодействие не имеет характера магнитостатического поля, а обладает электростатической природой. Поле неоднородного обмена пропорционально градиенту отклонения магнитного момента, и, следовательно, чем на меньших пространственных масштабах происходит данное отклонение, тем большие обменные поля при этом возникают. Возможны ситуации, когда на магнитный момент действуют другие силы. В качестве примера можно привести доменную стенку, где направление магнитного момента изменяется от направления в одном домене до направления в соседнем, что происходит благодаря конкуренции обменного поля и поля анизотропии. Резонирующая частица также является источником некоторого поля, влияющего на другие частицы. Это поле достаточно мало, чтобы учитывать его при вычислении эффективного поля H_{eff} , но оно влияет на время релаксации других частиц. Очевидно, чем больше резонирующих частиц, тем большее влияние испытывают другие частицы. Следовательно, время релаксации (или параметр релаксации) зависит от функции распределения доменов по резонансным частотам. Зависимость параметра α от функции распределения резонансных частот для поликристаллов и монокристаллов выбиралась в виде

$$\alpha = a - b\varphi(f_0)$$

$$\alpha = a_m - b_m\varphi_m(f_0), \quad (13)$$

где a , b и a_m , b_m — некоторые коэффициенты для поликристаллов и монокристаллов соответственно. Рассматривались и другие функции, но при аппроксимации экспериментальных данных они давали худший результат (большее значение суммы среднеквадратичных отклонений). Зависимости $\alpha(f_0)$ были получены при подстановке $\varphi(f_0)$ и $\varphi_m(f_0)$, описываемых формулами (11, 12) в (13).

5. Времена релаксации монокристаллов МЦШ

Расчеты времен релаксации были выполнены для монокристаллов МЦШ состава $\text{Mn}_{0.54}\text{Zn}_{0.36}\text{Fe}_{2.09}\text{O}_4$, которые отличались направлением плоскости ориентации кольца (тора) по кристаллографическим осям (111), (110), (211), (100) и амплитудой переменного магнитного поля h_0 (1 мЭ, 7 мЭ, 20 мЭ). В таблице 1 представлены значения характеристик образцов, для которых вычислялось время релаксации и коэффициен-

ты функции распределения. На рисунках 3 и 4 представлены экспериментальные графики зависимости $\mu'(f)$ и $\mu''(f)$ и графики аппроксимирующих функций для двух образцов (кривые с точками — экспериментальные графики, кривые без точек — аппроксимирующие функции). Для всех исследованных образцов коэффициенты функции $\varphi_m(f_0)$ $A_m = 2$, $B_m = 60$.

Таблица 1

Характеристики образцов монокристалла

№ образца	Плоскость, перпендикулярная оси симметрии тора	$H_A, \text{Э}$
1	(111)	0.15
2	(110)	0.15
3	(211)	0.12
4	(100)	0.15

На частотах менее 10^5 Гц при малых амплитудах внешнего переменного поля h_0 наблюдается рост значений $\mu''(f)$, который может быть обусловлен резонансом доменных границ. Для того чтобы исключить эти влияния на спектр ФМР, экспериментальные данные на частотах ниже 10^5 Гц не учитывались. Коэффициенты функции аппроксимации для параметра α при $b_m = 0.02$ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты функции аппроксимации параметра α

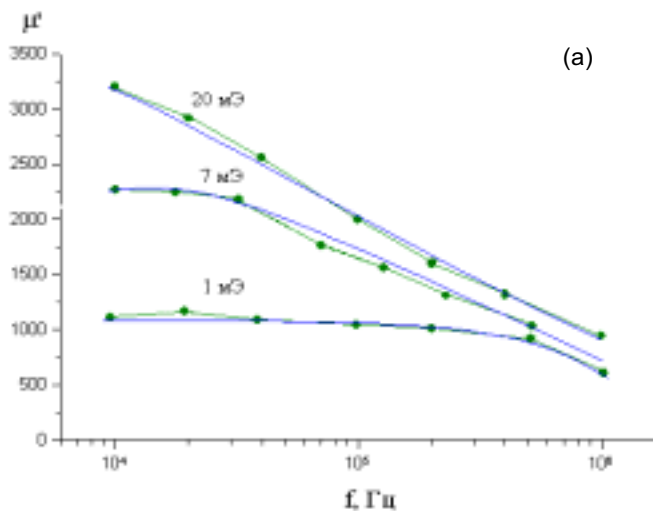
№ образца	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
$h_0, \text{мЭ}$	1	1	1	1	7	7	7	7	20	20	20	20
a_m	0.50	0.61	0.56	0.52	0.73	0.73	0.75	0.76	0.72	0.71	0.71	0.76

На основе построенных аппроксимированных кривых были оценены времена релаксации, найденные с помощью параметра α по формуле (3), обратного преобразования Фурье [22] и стандартным методом с помощью ширины резонансной кривой μ'' на полувысоте максимума $\mu(f)$. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Времена релаксации для монокристаллов МЦШ

№	h_0 , мЭ	Интервал τ , 10^{-7} с (с помощью параметра α)	τ , 10^{-7} с (преобразование Фурье)	τ , 10^{-7} с (стандартный метод)
1	1	(3.3-3.4)	3.1	4.8
2	1	(4.3-4.4)	3.7	4.8
3	1	(4.1-4.2)	3.8	6.2
4	1	(3.4-3.5)	3.4	5.2
1	7	(2.2-2.3)	2.0	2.9
2	7	(2.2-2.3)	2.1	4.2
3	7	(2.5-2.6)	2.2	4.2
4	7	(2.6-2.7)	2.5	4.5
1	20	(2.1-2.2)	2.3	14
2	20	(2.0-2.1)	2.1	10
3	20	(2.0-2.1)	2.3	10
4	20	(2.6-2.7)	2.5	7.4



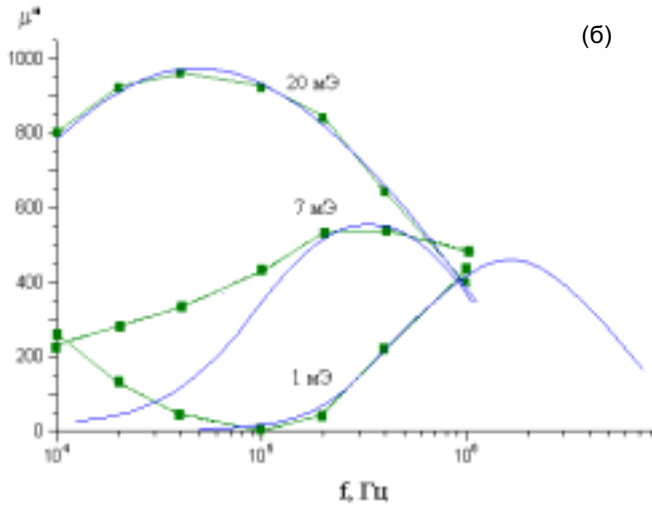
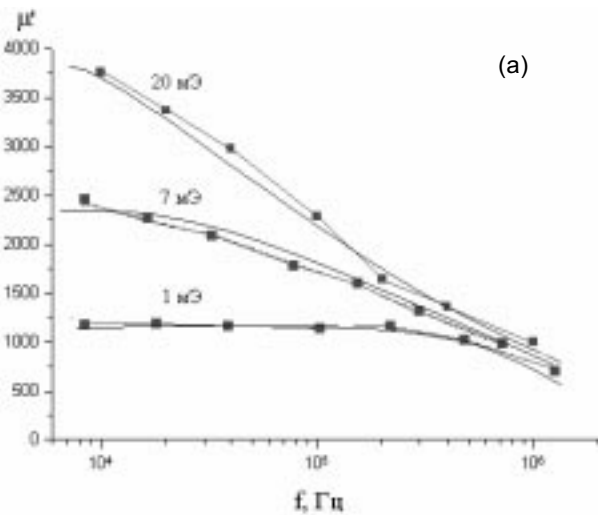


Рис. 3. Зависимость действительной (а) и мнимой (б) компонент магнитной проницаемости от частоты для монокристалла МЦШ (образец № 1, амплитуда внешнего поля h_0 1мЭ, 7мЭ, 20мЭ). Сплошные кривые — расчётные данные, кривые с точками — экспериментальные данные



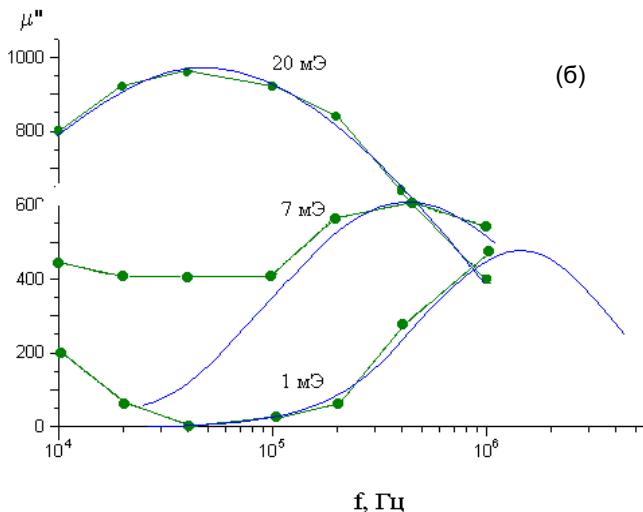


Рис. 4. Зависимость действительной (а) и мнимой (б) компонент магнитной проницаемости от частоты для монокристалла МЦШ (образец № 2, амплитуда внешнего поля h_0 1мЭ, 7мЭ, 20мЭ). Обозначения те же, что и на рис. 3

6. Времена релаксации поликристаллов МЦШ

Расчеты были выполнены для поликристаллов МЦШ состава $Mn_{0.63}Zn_{0.29}Fe_{2.08}O_4$, пористостью 0.003, средним размером зерна 20.2 мкм, полем анизотропии $H_A = 0.04$ Э и разной амплитудой внешнего магнитного поля h_0 (1мЭ и 20мЭ). Экспериментальные данные были взяты из работы [23]. Графики экспериментальных зависимостей $\mu'(f)$ и $\mu''(f)$ и графики аппроксимирующих кривых представлены на рисунках 5, 6. Коэффициенты функции аппроксимации параметра α для поликристаллов МЦШ (12) и (13) приведены в таблице 4.

Таблица 4

Коэффициенты функции аппроксимации параметра α для поликристаллов МЦШ

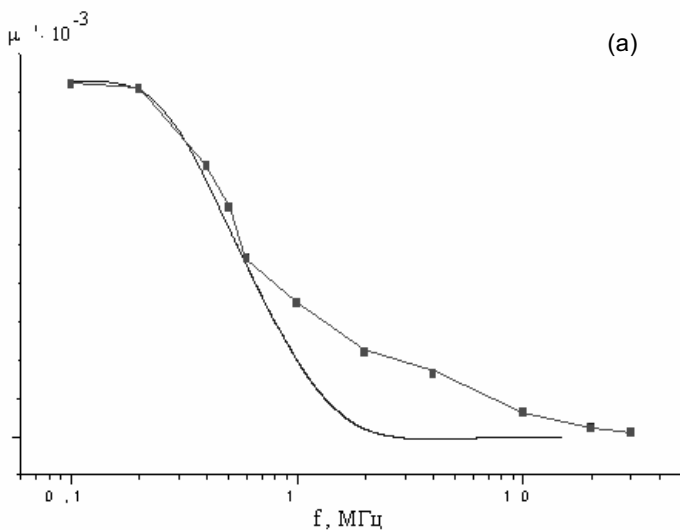
№	h_0 , мЭ	a	b	$\varphi(f_0)$	
				A	B
1	0.2	0,62	0,33	39	$5.1 \cdot 10^{-3}$
2	20	0,81	0,45	39	$5.1 \cdot 10^{-3}$

Так же, как и для монокристалла, на основе построенных кривых были оценены времена релаксации, найденные с помощью параметра α , обратного преобразования Фурье [22] и стандартным методом по ширине резонансной кривой μ'' на половине максимального значения. Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Таблица 5

Времена релаксации для поликристаллов МЦШ

№	h_0 , мЭ	Диапазон τ , 10^{-7} с (с помощью параметра α)	τ , 10^{-7} с (преобразование Фурье)	τ , 10^{-7} с (стандартный метод)
1	0.2	(2.5-5.6)	3.2	4.2
2	20	(3.3-8.2)	8.2	7.4



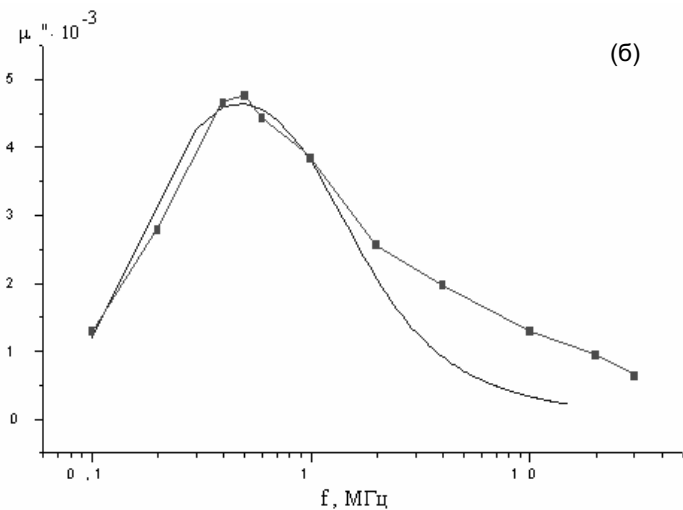
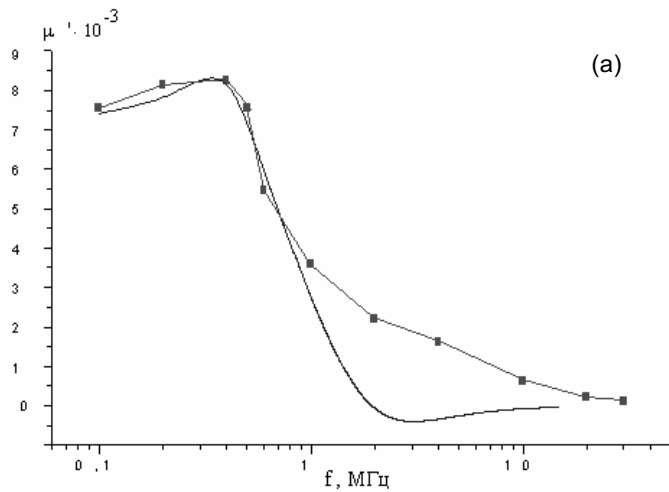


Рис. 5. Зависимость действительной (а) и мнимой (б) компонент магнитной проницаемости от частоты для образца поликристалла № 1



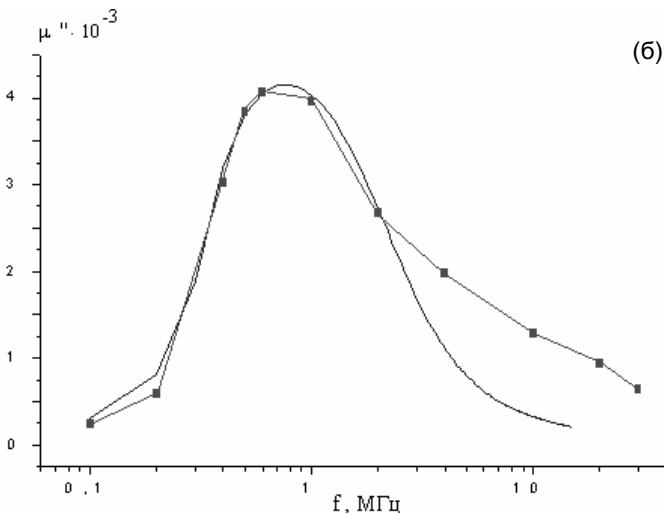


Рис. 6. Зависимость действительной (а) и мнимой (б) компонент магнитной проницаемости от частоты для образца поликристалла № 2

7. Времена релаксации, оцененные разными методами

Времена релаксации монокристаллов, оцененные различными способами, отличаются в некоторых случаях на порядок: полученные с помощью вычисления параметра релаксации и методом обратного преобразования Фурье лежат в пределах 10^{-7} с, а оцененные — по полуширине порядка 10^{-6} - 10^{-7} с. Как указано в [7], времена релаксации магнитных моментов монокристаллов МЦШ лежат в интервале 10^7 - 10^8 с, и, следовательно, оценка с помощью вычисления параметра α и обратного преобразования Фурье может быть более точной. Вероятно, это обусловлено следующим. При вычислениях с помощью метода параметра релаксации и методом обратного преобразования Фурье используются как реальная компонента проницаемости μ' , так и мнимая μ'' . Это повышает точность вычислений за счет привлечения большего числа экспериментальных точек. При оценке же времени релаксации по полуширине пика использовались экспериментальные точки только для мнимой компоненты μ'' . Компонента μ' аппроксимировалась в диапазоне частот 10^4 - 10^7 Гц. В то же время при $h_0 = 1$ мЭ и $h_0 = 7$ мЭ μ'' практически для всех образцов представлена лишь одним склоном пика экспериментальных данных: в диапазоне частот 10^4 - 10^6 Гц. Для большего числа ферритов экспериментальные данные для μ'' могут быть измерены только в области частот, меньших, чем частота резонанса.

Это связано с увеличением потерь (характеризуемых отношением μ''/μ') на более высоких частотах. Поэтому поведение μ'' оценивалось приблизительно из условий $\mu''(0) = 0$ и $\mu''(\infty) = 0$. В этом случае из данных эксперимента для μ'' не видно, где находится максимум мнимой компоненты, и его значение может быть определено с большой погрешностью. В связи с этим за максимум μ'' принимается значение, соответствующее максимальной частоте, что увеличивает погрешность. Для многих кривых при амплитуде внешнего поля 1мЭ и 7мЭ невозможно точно оценить ширину пика μ'' , погрешность может быть очень высока.

Кроме того, существуют некоторые преимущества при вычислении времен релаксации с помощью параметра релаксации по сравнению с другими методами: теоретические кривые (11) и (12) взаимосвязаны, подбором коэффициентов выбираются единственные кривые, которые наиболее близко подходят к экспериментальным точкам, т.е. можно однозначно определить коэффициенты A и B (13) для вычисления времени релаксации. Тем самым точность измерений не зависит от того, что μ'' для образцов представлена лишь одним склоном пика экспериментальных данных.

Еще одно существенное отличие от предыдущих методов заключается в том, что с помощью параметра релаксации можно найти время релаксации не только всего образца, но и любого домена, зная его собственную частоту.

Таким образом, для монокристаллов в связи с тем, что разброс времен релаксации для всех магнитных моментов незначителен, предпочтительнее использовать стандартный метод, когда в частотном диапазоне виден весь пик мнимой компоненты. Этот метод проще, т.к. вычисление параметра релаксации и метод обратного преобразования Фурье требуют предварительной обработки данных. В остальных случаях определение τ с помощью метода, основанного на расчете α , предпочтительнее, т.к. он более точен.

Для поликристаллов определение времени релаксации с помощью вычисления параметра диссипации более предпочтительно и позволяет не только оценивать время релаксации ферритов с хорошей точностью, но и оценивать распределение колебания вектора намагниченности в доменах по временам релаксации, что невозможно другими рассмотренными методами.

На времена релаксации монокристаллов не оказывает значительного влияния ни изменение плоскости ориентации, ни изменение амплитуды внешнего переменного поля h_0 . Оно остается постоянным в пределах погрешности измерений и примерно равно $3 \cdot 10^{-7}$ с. Монокристаллы, как правило, обладают меньшими нарушениями внутренней структуры, и, следовательно, они не имеют сильного влияния на магнитную структуру.

Для малой амплитуды внешнего поля время релаксации для поликристаллов МЦШ составляет $(2.5-5.6) \cdot 10^{-7}$ с, не сильно отличаясь от времени релаксации монокристаллов, равного $3 \cdot 10^{-7}$ с. Но при увеличении амплитуды h_0 время релаксации магнитных моментов в поликристалле возрастает и составляет $(3.3-8.2) \cdot 10^{-7}$ с. При этом, как видно, увеличивается и дисперсия значений τ , что является подтверждением выводов работы [22].

Амплитуда внешнего переменного магнитного поля влияет на время релаксации в большей степени в поликристаллах. По-видимому, это связано с тем, что при увеличении амплитуды внешнего переменного поля увеличивается дисперсия собственных частот f_0 в доменах и соответственно меняется среднее время релаксации.

Результаты данного исследования показывают, что релаксационные и частотные характеристики многих радиотехнических устройств, изготовленных на основе поликристаллических ферромагнетиков, могут варьироваться с помощью изменения амплитуды внешнего переменного магнитного поля.

* * *

1. Микушев В.М., Чарная Е.В. Ядерный магнитный резонанс в твердом теле. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1995. 202 с.
2. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 592 с.
3. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений. М.: Изд-во МГУ, 1976. 334 с.
4. Ферромагнитный резонанс: Сб. / Под ред. С.В. Волсовского. М.: ИЛ, 1961. С. 25.
5. Фоменко Л.А. Об естественном ферромагнитном резонансе в ферритах // ФТТ. 1964. Т. 6. № 2. С. 337-350.
6. Спин-фононные взаимодействия в кристаллах (ферритах) / Б.А. Голдин, Л.Н. Котов, Л.К. Зарембо, С.Н. Карпачев. Л.: Наука, 1991. 145 с.
7. Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов: Пер. с нем. М.: Мир, 1976. Т. 2. 336 с.
8. Lecraw R.C., Spencer E.G., Porter C.S. Ferromagnetic resonance line width in YIG single crystals // Phys. Rev., 1958, vol. 110, p. 1311.
9. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения: Пер. с япон. М.: Мир; ИЛ, 1987. 420 с.
10. Янковский Я.К., Ранкис Г.Ж. Сравнение параметров магнитных спектров поликристаллических ферритов // Радиоэлектроника и электросвязь. Рига, 1973. Вып. 1. С. 87-92.
11. Harrison S.E., Kriessmann C.J., Pollack S.R. Magnetic spectra of manganese ferrites // Phys. Rev., 1958, vol. 104, pp. 844-849.
12. Kittel C., Abrahams E. Relaxation processes in ferromagnetism // Rev. Mod. Phys., 1953, vol. 25, p. 233.
13. Park D. Magnetic rotation phenomena in polycrystalline ferrite // Phys. Rev., 1955, vol. 97, №1. pp. 60-66.

14. Torres L., Zazo M., Iniguez J., Munoz J.M. Effect of slowly relaxing impurities of ferrimagnetic resonance linewidths of single crystal nickel ferrites // *IEEE Trans. Magn.*, 1993, vol. 29, № 62, pp. 3434-3436.
15. Malaescu I., Stefu N., Gabor L. Relaxation process and ferromagnetic resonance investigation of ferrofluids with Mn-Zn and Mn-Fe mixed ferrite particles // *JMMM*, 2001, vol.234, pp. 299-305.
16. Coffey W.T., Crothers D.S.F., Kalmykov Yu.P., Massawe E.S., Waldron J.T. Exact analytic formula for the correlation time of a single-domain ferromagnetic particle // *Phys. Rev. E.*, 1994, vol. 49, №3, pp. 1869-1882.
17. Барьяхтар В.Г. Феноменологическая теория релаксационных процессов в ферромагнетике (обзор) // *Магн. и электр. свойства матер.* 1989. № 1. С. 3-32.
18. Ранкис Г.Ж., Янковский Я.К. О моделях начальной восприимчивости поликристаллических ферритов // *Радиоэлектроника и электросвязь.* Рига, 1974. Вып. 2. 396 с.
19. Смит Я., Вейн Х. Ферриты: Пер. с англ. М.: ИЛ, 1969. 584 с.
20. Бажуков К.Ю., Котов Л.Н., Асадуллин Ф.Ф. Расчёт магнитных спектров поликристаллических ферритов // *НМММ: Тезисы докладов XVI Международной школы-семинара.* МГУ, 1998. Ч. 1. С. 326-327.
21. Ранкис Г.Ж. Динамика намагничивания поликристаллических ферритов. Рига: Зинатне, 1981. 384 с.
22. Бажуков К.Ю., Гольчевский Ю.В., Котов Л.Н. Расчёт времени релаксации на основе частотных спектров ферритов // *ЖТФ.* 2000. Т. 70. Вып. 8. С. 97-99.
23. Харинская М.А., Абаренкова С.Г. Магнитные спектры Mn-Zn ферритов для магнитных головок // *Электронная техника.* 1990. Вып. 3 (248). С. 23-26. (Сер. 6. Материалы.)

**В.Н. Сивков¹, А.С. Виноградов², С.В. Некипелов¹, Д.В. Сивков¹,
D.V. Vyalikh³ and S.L. Molodtsov^{2,3}**

¹ Сыктывкарский государственный университет,
г.Сыктывкар, 167001, Россия: svn@syktsu.ru

² Институт физики Санкт-Петербургского
государственного университета,

³ Russian-German Laboratory at BESSY II, 12489,
Berlin-Adleshof, Germany

**Применение абсорбционных Ti-фильтров
для абсолютных измерений сечений поглощения
в области N1s — края азота в пленках NaNO₃ с использованием
синхротронного излучения**

Разработан эффективный метод проведения абсолютных измерений сечений поглощения в области энергий квантов 300-460 эВ с использованием синхротронного излучения Российско-Германского канала электронного накопителя BESSY-II (Берлин, Германия). С помощью этого метода получены данные о распределении сил осцилляторов в области резонансной структуры N1s края кристалла NaNO₃, которые хорошо согласуются с результатами исследований, проведенных ранее с помощью лабораторного спектрометра на рентгеновской трубке в качестве источника излучения.

Экспериментальные данные по спектральным распределениям дипольных сил осцилляторов полиатомных систем в широкой спектральной области представляют собой фундаментальную информацию, которая выражается в виде правил сумм, непосредственно связывающих моменты распределений с различными физическими свойствами [1, 2]. Особый интерес в распределениях сил осцилляторов представляют собой силы осцилляторов отдельных рентгеновских переходов, которые количественно описывают процессы взаимодействия фотонов и частиц определенной энергии с веществом и дают возможность тестировать результаты теоретических расчетов.

В последние два десятилетия был достигнут большой экспериментальный прогресс в области ультрамягкой рентгеновской спектроскопии и ближняя тонкая структура рентгеновских спектров поглощения стала широко использоваться для изучения локальной электронной структуры и химического окружения поглощающего атома [3,4]. Проявление в этих спектрах переходов с внутренних атомных оболочек, которые сильно локализованы внутри малых полиатомных групп (поглощающий атом и атомы ближайшего окружения), представляет наибольший интерес. Число этих возбуждений (резонансов формы), а также их относительные интенсивности, симметрия и энергетические положения характеризуют свойства незанятых электронных состояний и гео-

метрическую структуру соответствующей полиатомной группы. При этом, однако, не рассматриваются данные по абсолютным интенсивностям переходов (силы осцилляторов), которые представляются важными спектроскопическими параметрами не только для подобных структурных исследований, но и для таких новых экспериментальных методов, как резонансная фотоэмиссия и резонансная флуоресценция. Отсутствие информации о силах осцилляторов рентгеновских переходов обусловлено тем, что прямые измерения сечений поглощения в ультрамягкой рентгеновской области представляют сложную задачу. Длинноволновое рассеянное и коротковолновое излучения, отраженные дифракционной решеткой в высоких порядках дифракции, затрудняют проведение трансмиссионных измерений сечений поглощения. Особенно затруднительны измерения в области 1s порогов ионизации атомов С, N и O ($h\nu \sim 250 - 600$ eV) с использованием синхротронного излучения (СИ), т.к. наличие интенсивного излучения 2 и 3 порядков дифракции и загрязнений на оптических элементах монохроматора могут приводить к появлению дополнительной структуры в спектрах поглощения. Для получения надежных данных по сечениям поглощения эти искажающие факторы должны быть измерены или полностью подавлены. Одним из реальных способов решения проблемы является использование двух зеркальных фильтров-отражателей [5, 6], которые были успешно использованы при измерениях сечений поглощения простых молекул. Однако этот метод не учитывает влияние рассеянного длинноволнового ВУФ-излучения, что необходимо при измерениях сечений поглощения образцов с малой оптической плотностью. Ранее нами [7, 8] было показано, что измерения сечений поглощения в области N1s края могут быть проведены с использованием Ti абсорбционного фильтра в комбинации с одним зеркальным фильтром-отражателем для эффективного подавления фона. Метод Ti-фильтра был успешно применен для исследования спектральных зависимостей сечений поглощения молекулы N₂ и слоев NaNO₃ с помощью спектрометра РСМ-500 с рентгеновской трубкой в качестве источника рентгеновского излучения. Полученные данные о распределении сил осцилляторов в области резонансной структуры N1s края кристалла NaNO₃ использованы в настоящей работе для тестирования в процессе разработки методики абсолютных измерений с использованием СИ Российско-Германского канала электронного накопителя BESSY-II (Берлин, Германия).

Для проведения абсолютных измерений сечений поглощения с применением СИ необходимо решить ряд достаточно сложных технических и методических проблем. Выбор в качестве объекта для исследования пленок определялся тем, что НК-спектры NaNO₃ хорошо исследованы на лабораторном спектрометре РСМ-500, развиты методики приготовления этих пленок заданной толщины и их тестирования. Существенно, что пленки NaNO₃ устойчивы при выносе на атмосферу, не

очень гигроскопичны и могут быть приготовлены в широком диапазоне толщины на подложках из свободных пленок титана вне измерительной камеры, используемой при измерениях на синхротроне. Кроме того, пленки NaNO_3 выдерживают длительный прогрев в высоком вакууме до 250°C , что необходимо для достижения в измерительной камере рабочего вакуума порядка $1 \cdot 10^{-9}$ мм.рт.см. Одной из технических проблем, которую предварительно необходимо было решить, является разработка держателя подложки с образцом (свободные пленки титана толщиной 1500\AA). Подложки на щелях должны выдерживать длительный прогрев в вакууме и в то же время иметь достаточно большую поверхность, чтобы края держателя образцов не ограничивали пучок синхротронного излучения и позволяли проводить юстировку образца во время измерений. Проведенные исследования показали, что самой подходящей для этой цели являются медные держатели с круглыми щелями диаметром не более 1.5 мм. Закрепленные на таких щелях свободные титановые пленки толщиной 1500\AA с осажденными методом термического испарения слоями NaNO_3 разной толщины при прогреве в вакууме в течение суток не рвались и не деформировались. Процесс приготовления образцов для исследования был следующим. Сначала изготавливалась серия свободных пленок титана толщиной около 1500\AA , которые устанавливались на медные держатели. Далее на эмиссионной линии OK_α измерялась оптическая плотность пленок и отбирались те пленки, оптические плотности которых не различались в пределах 1%. На выбранные пленки наносились методом термического испарения в вакууме слои NaNO_3 толщиной 340\AA , 600\AA , 1100\AA и 1800\AA . Затем эти щели со свободной пленкой титана и пленками со слоями NaNO_3 переносились в измерительную камеру и закреплялись на держателе, который устанавливался на манипуляторе. С помощью манипулятора путем перемещения держателя образцов в вертикальном направлении и в горизонтальной плоскости и вращением его вокруг вертикальной оси проводилась смена образцов и их установка на рентгеновском пучке без нарушения вакуума. Регистрация интенсивности рентгеновского излучения проводилась методом полного электронного выхода в токовом режиме из фотокатода CsI. Выбор материала фотокатода определялся высоким квантовым выходом CsI (40%) в исследуемой области спектра, а также возможностью контролировать наличие излучения второго порядка в падающем рентгеновском пучке, дающего вклад в немонохроматический фон в области N1s — края поглощения ($\sim 400\text{ eV}$), по тонкой структуре во втором порядке дифракции $M_{4,5}$ — спектра поглощения атома цезия в CsI (726-741 эВ). Исследования спектральных зависимостей сечения поглощения в области резонансной структуры N1s — спектра поглощения NaNO_3 — проводились методом фотопоглощения (трансмиссии). При этом сначала измерялась интенсивность рентгеновского синхротронного излучения

I_0 , проходящего через свободную пленку титана, а затем интенсивность излучения I , проходящего через пленку со слоем NaNO_3 . Далее после нормировки измеренных интенсивностей на электронный ток в накопительном кольце BESSY-II и вычитания из них немонахроматического фона определялась спектральная зависимость сечения поглощения как результат деления логарифма отношения падающей и проходящей через образец интенсивностей на оптическую плотность образца. Ключевым моментом в такой методике измерений сечений поглощения является корректное измерение уровня рассеянного немонахроматического фона, который включает в себя коротковолновое излучение второго порядка по отношению к исследуемой области спектра и длинноволновое ВУФ-излучение. Для последнего характерно высокое сечение поглощения в азотсодержащих соединениях, что приводит к большим ошибкам в измерениях сечений поглощения в области резонансной структуры, особенно в тонкопленочных образцах. С целью оценки величины длинноволновой и коротковолновой составляющих фона в синхротронном излучении нами были проведены исследования поглощения при двух значениях коэффициента фиксированного фокуса $C_{\text{ff}} = 1.5$ и $C_{\text{ff}} = 2.25$. Постоянная $C_{\text{ff}} = \cos\beta/\cos\alpha$ (где α и β угол падения и угол дифракции, отсчитанные от нормали к плоской решетке, соответственно) определяет энергетическое разрешение монохроматора, степень подавления коротковолнового излучения высоких порядков и яркость синхротронного излучения на выходе монохроматора. Так, согласно расчетам [9], при $C_{\text{ff}} < 1.6$ в исследуемой области спектра 400-450эВ энергетическое разрешение ΔE оказывается не хуже 0.1эВ при ширине выходной щели 20 мкм и обеспечивается полное подавление коротковолновой составляющей фона (2 и 3 порядки). Однако при $C_{\text{ff}} = 2.25$ коротковолновый фон уже составляет более 10%, но при этом энергетическое разрешение оказывается в два раза меньшим. Выбор постоянных C_{ff} определялся возможностью: (1) оценить уровни длинноволновой и коротковолновой составляющих фона в синхротронном излучении, (2) выяснить эффективность титанового абсорбционного фильтра в подавлении этих составляющих в проходящем через Ti-фильтр монохроматизированном синхротронном рентгеновском излучении.

Первоначально нами были исследованы при $C_{\text{ff}} = 1.5$ и $C_{\text{ff}} = 2.25$ спектры квантового выхода фотокатода CsI, который представлял собой ядную пластину с нанесенным методом термического испарения в вакууме толстым слоем CsI. На рисунках 1 и 2 показаны спектральные зависимости интенсивностей падающего (1), проходящего через Ti-пленку (2) и через Ti-пленку со слоем NaNO_3 толщиной 110 нм (3) и 180 нм (4), измеренные в интервале энергий квантов 260-560эВ при $C_{\text{ff}} = 1.5$ и $C_{\text{ff}} = 2.25$ соответственно. Стрелками отмечены положения СК-, НК-, ОК-, TiL_3 - и CsM_5 (второй порядок) — краев поглощения, а штриховой линией — уровень фона. В этих спектрах проявляется сильный провал

в регистрируемой интенсивности в области К- края поглощения углерода (~290 эВ), появление которого обусловлено наличием на отражающих поверхностях углеродных загрязнений. Следует отметить, что при $C_{ff} = 1.5$ в спектре квантового выхода CsI отсутствует тонкая структура $CsM_{4,5}$ — спектра поглощения (740-760эВ). Это указывает на пренебрежимо малое количество фонового излучения второго порядка для области спектра 300-400эВ. При этом в спектре при $C_{ff} = 2.25$, представленном на рисунке 2, эта структура отчетливо видна, что демонстрирует наличие достаточно большого коротковолнового фона в синхротронном излучении. Проведенные нами ранее исследования на спектрометре РСМ-500 показали, что наличие на отражающих поверхностях оптических элементов спектрометра (фильтрующее зеркало, дифракционная решетка) слоя углеродных загрязнений толщиной в несколько десятков ангстрем приводит к полному подавлению монохроматизированного излучения в области СК- края поглощения (280-290эВ) вследствие скользких углов падения и отражения рентгеновского излучения. Принимая это во внимание и учитывая отсутствие коротковолновой составляющей фона при $C_{ff} = 1.5$, можно оценить величину длинноволновой составляющей фона в синхротронном излучении в пределах 8-10 % от уровня интенсивности в области N1s — края поглощения при использовании фотокатода CsI для регистрации рентгеновского излучения. Таким образом, уровень длинноволнового фона в синхротронном пучке достаточно велик и он должен быть существенно понижен и корректно измерен, иначе проведение абсолютных измерений сечений поглощения, особенно для образцов с малой оптической плотностью, будет невозможным. Для решения этой проблемы было решено воспользоваться фильтрами из свободных пленок титана, используя их одновременно в качестве подложек для исследуемых образцов. Кривая 2 на рисунке 1 показывает сильное подавление коротковолнового излучения выше TiL_3 — края (454эВ), особенно в области $2p_{3/2}$ — и $2p_{1/2}$ — полос поглощения. В последнем случае интенсивность СИ составляет менее 1% от интенсивности падающего излучения и хорошо согласуется с рассчитанным уровнем коротковолнового фона. Отсутствие структуры во 2-м порядке дифракции в области $CsM_{4,5}$ — края подтверждает низкий уровень коротковолнового фона. Близкие значения минимальной интенсивности СИ в области СК — края и интенсивности в области $TiL_{2,3}$ — края означает полное подавление ВУФ-компоненты фона Ti-фильтром.

Аналогичные исследования при $C_{ff} = 2.25$ показали (рис.2) близкие значения интенсивности синхротронного излучения в области СК- и $TiL_{2,3}$ — краев поглощения, но при этом интенсивность синхротронного излучения в области $2p_{3/2}$ — и $2p_{1/2}$ — полос поглощения составляет 11-12 % от уровня интенсивности с длинноволновой стороны от TiL_3 — порога ионизации, что согласуется с расчетным уровнем коротковолнового

фона. Кривые 1 и 2 на рисунке 2 демонстрируют две интенсивные полосы в области $\text{CsM}_{4,5}$ — края поглощения во втором порядке дифракции вследствие наличия существенного коротковолнового фона в падающем монохроматизированном излучении. Следует отметить, что после прохождения через титановую пленку интенсивность тонкой структуры $\text{CsM}_{4,5}$ — спектра поглощения уменьшилась в 4 раза, что согласуется с рассчитанным пропусканием титановой пленки в области 740эВ (линейный коэффициент поглощения $0.86 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$). Таким образом, использование титанового фильтра в виде свободной пленки толщиной около 1500А позволяет полностью подавить длинноволновую компоненту рассеянного фона, значительно уменьшить коротковолновую составляющую фона и измерить его величину по уровню интенсивности в области $\text{Ti}2p_{3/2}$ и $\text{Ti}2p_{1/2}$ — полос поглощения. Однако использование титанового фильтра не может обеспечить полного подавления излучения высоких порядков при больших C_{ff} . Возможно, для этого необходимо дополнительно использовать двухзеркальный или однозеркальный фильтр-отражатель. На следующем этапе нами были проведены измерения спектральных зависимостей сечений поглощения пленок NaNO_3 толщиной 340Å, 600Å, 1100Å и 1800Å и определены из них силы осцилляторов резонансных переходов с учетом рассеянного немонахроматического фона по описанной выше методике. При этом сечение поглощения σ определяется из уравнения:

$$\mu(E) = \frac{1}{n \cdot d} \ln \frac{I(E) \cdot I_{\phi}(E)}{I_0(E) \cdot I_{0\phi}(E)}$$

где I_0 , $I_{0\phi}$ и I , I_{ϕ} — измеряемые интенсивности монохроматизированного рентгеновского излучения и рассеянного фона в падающем и проходящем рентгеновских пучках соответственно, n — концентрация поглощающих атомов в исследуемом твердотельном образце, d — толщина образца. Сила осцилляторов f определяется путем интегрирования экспериментальной зависимости сечения поглощения σ (в Мб) от энергии кванта E (в эВ) из соотношения [11]:

$$\mu(E) = 109.8 \cdot f(E)$$

На рисунке 3 приведены спектральные зависимости сечения поглощения в области N1s — края слоев NaNO_3 толщиной 340Å(1), 600Å(2), 1100Å(3) и 1800Å(4), полученные при $C_{\text{ff}} = 1.5$. В этих зависимостях доминируют узкая (405.3эВ) и широкая (416эВ), которые обусловлены переходами N1s электрона на свободные состояния аниона NO_3 ($\pi(a_{2u})$ - и $\sigma(a_{1g}, e_u)$ - симметрия (π - и σ - резонансы формы) [10]. Существенно, что измеренные значения сечений поглощения с длинноволновой и коротковолновой стороны на расстоянии нескольких десятков эВ от N1s —

края поглощения? хорошо согласуются с результатами измерений на рентгеновских эмиссионных линиях TiL_{γ} (0.5Мб) и TiL_{χ} (0.9Мб) [8]. Это является убедительным обоснованием предложенной методики абсолютных измерений сечения поглощения с использованием синхротронного излучения. Из сравнения кривых 1-4 видно, что площадь резонансов уменьшается с толщиной слоев $NaNO_3$. Это явление объясняется влиянием хвостов спектрального окна спектрометра [7, 8], или как известный «эффект толщины» [12]. На рисунке 4 представлены зависимости полной силы осциллятора f для π - и σ -резонансов формы от толщины исследуемого образца и показана экстраполяция f к «нулевой» толщине. Экстраполированные величины силы осциллятора оказались равными 0.07 и 0.162 для π - и σ -резонансов формы соответственно. При этом полученные методом экстраполяции к «нулевой» толщине значения силы осциллятора этого резонанса хорошо согласуются с данными, полученными ранее на рентгеновском спектрометре-монохроматоре РСМ-500[8].

В заключение следует отметить, что исследования $N1s$ — спектров поглощения $NaNO_3$ продемонстрировали возможности предлагаемой методики, которая позволяет проводить надежные измерения спектральных зависимостей сечений поглощения и определять из них распределение сил осцилляторов в области резонансной структуры рентгеновских спектров составляющих атомов в твердотельных соединениях в спектральной области 300-450эВ. Аналогичная методика абсолютных измерений сечений поглощения может быть развита на основе использования в качестве фильтров пленок $3d$ — переходных металлов и для более коротковолновой области спектра, что позволит в перспективе проводить исследования по распределению сил осцилляторов в области К-краев поглощения атома кислорода и фтора, а также $L_{2,3}$ — краев поглощения $3d$ — переходных металлов в широком круге соединений.

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ грант № 04-02-17216 двухсторонней программы Российско-Германской лаборатории на BESSY-II и целевой Программы развития научного потенциала высшей школы (НПП 2.1.1.3425).

* * *

1. U. Fano, J.W. Cooper. Rev. Mod. Phys. 1968, V.40, С.441, 1968, V.41, С. 724.
2. M. Inokutti. Rev. Mod. Phys. 1971, V. 43, С. 297.
3. J. Stohr. *NEXAFS Spectroscopy*, Springer, Berlin, 1992.
4. J.C. Fuggle, J.E. Inglesfield, eds. Unoccupied electronic states. Fundamentals for XANES, EELS, IPS and BIS. Springer, Berlin, 1992.
5. E.S. Gluskin, E.M. Trachtenberg, A.S. Vinogradov. Nucl. Instrum. and Meth. 1978, V.152, С. 133.

6. W.B.Peatman. BESSY Technical Report TB Nr. 160/90.
7. Сивков В.Н., Виноградов А.С. // Опт. и спектр. 2002. Т. 63, С. 431.
8. Сивков В.Н., Виноградов А.С. // Поверхность. 2002. № 11. С. 51.
9. S.A. Gorodovikov, S.L. Molodtsov, R. Follath, Nucl. Instrum. and Meth. A 1998, V. 411, С. 506.
10. A.S. Vinogradov, V.N. Akimov, Phys.Low.-Dim. Struct., 1994, V. 4/5, С. 63.
11. Фано. У, Купер. Дж. Спектральное распределение сил осцилляторов в атомах. М.: Наука, 1972. 191 с.
12. L.G. Parratt, C.F. Hempstead, E.L. Jossem Phys. Rev., 1957, V. 105, С. 1228.

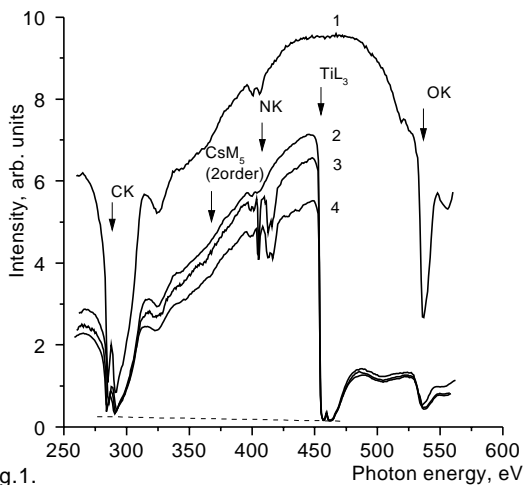


Fig.1. The spectral distribution of X-ray intensity for $C_{и}=1.5$.

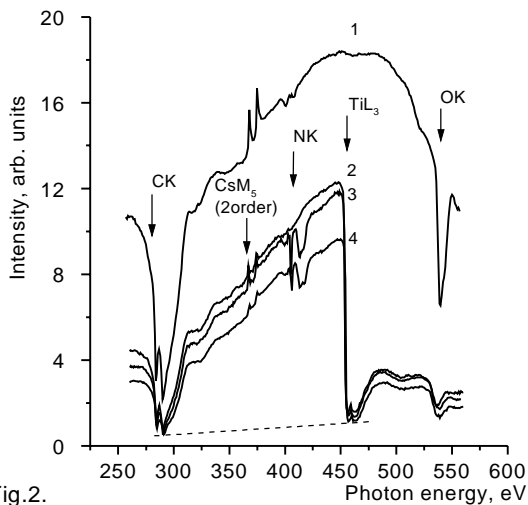


Fig.2. The spectral distribution of X-ray intensity for $C_{и}=2.25$.

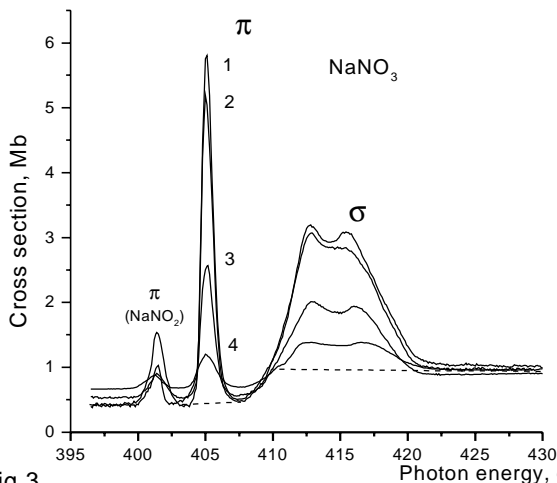


Fig.3. The spectral distribution of absorption cross section at the N 1s edge for NaNO_3 layers of the varied thickness.

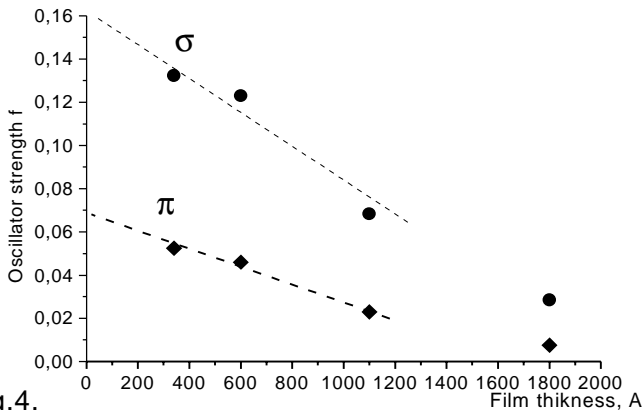


Fig.4. The total oscillator strength for the π and σ shape resonances.

Химия

Б.Я. Брач, А.Н. Низовцев
Сыктывкарский госуниверситет

Получение пористой керамики из гидроксипатита кальция, допированного хромом и магнием

На основании экспериментальных данных показано влияние на физико-химические свойства керамики при совместном введении магния и хрома (VI) в составе образцов.

Требования медицинской науки в области разработки синтетических имплантантов привели к появлению нового направления химического материаловедения — синтез медицинских материалов специального хирургического назначения. К медицинским материалам, в частности к имплантантам, существует ряд жестких, специфических требований. Они должны обладать биосовместимостью с органическими тканями, но быть биоинертными в процессе эксплуатации, т.е. не приводить к выделению токсических веществ, находясь в тесном контакте с тканями организма.

Гидроксипатит кальция широко используется в медицинской практике именно благодаря соответствию указанным требованиям, главным из которых является биологическая совместимость, кроме того, он стимулирует рост клеток опорных тканей, образуя новую кость.

Получение новых фаз на основе гидроксипатита кальция — одна из фундаментальных проблем химии и технологии гидроксипатита. Введение различных добавок может повысить или при неблагоприятном исходе снизить прочностные характеристики биокерамики без ущерба для биологической совместимости.

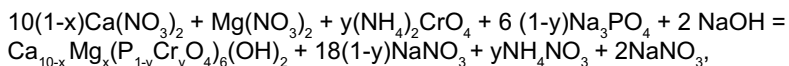
Исследования катионообменных характеристик гидроксипатита кальция показали, что в условиях функционирования человеческого организма происходит частичное замещение кальция ионами металлов, попадающих в организм вместе с продуктами питания и водой, как результат загрязнения окружающей среды. По этой причине в организме человека происходит накопление различных веществ, в том числе и токсичных [1].

Целью настоящего исследования являлось получение гидроксипатита кальция с частичным замещением фосфора на хром и кальций на магний и изучение влияния хрома и магния на прочностные свойства гидроксипатитной керамики.

Кристаллы гидроксипатита относятся к гексагональной сингонии с пространственной группой $R\bar{6}3/m$. Характерной особенностью структу-

ры гидроксиапатита является «нестехиометрия». Величина Ca/P, которая в этих соединениях колеблется от 1,2 до 2,0, используется как показатель нестехиометричности. Керамика на основе гидроксиапатита (ГАК) представляет собой твердый материал, состоящий из кристаллитов (удельная поверхность при 100% кристаллизации от 1 м²/г и ниже). ГАК обладает гидрофильной поверхностью, и в водных растворах за короткое время устанавливается равновесие с окружающей средой благодаря ее способности к ионному обмену. Из анализа литературных данных следует, что гидроксиапатиты смешанного состава Ca₁₀(P_{1-y}Cr_yO₄)₆(OH)₂ и Ca_{10-x}Mg_x(P_{1-y}Cr_yO₄)₆(OH)₂ не изучались.

Получение порошка смешанного гидроксиапатитного состава проводили «мокрым» методом, а именно совместным осаждением из раствора состава по реакциям:



где x от 0 до 2,9, y от 0 до 2,7.

Методика синтеза методом соосаждения разработана В.П. Орловским [2]. К смеси растворов Na₃PO₄ и (NH₄)₂CrO₄ при постоянном перемешивании добавляли раствор NaOH, полученную смесь растворов тонкой струей приливали к смеси растворов Mg(NO₃)₂ и Ca(NO₃)₂. Соотношение (Ca + Mg)/(P + Cr) в смешанном растворе отвечало 1,67. В полученный раствор добавляли раствор NaOH до значения pH = 10. Образовавшийся осадок подвергали старению в течение 24 часов и кипячению, затем отфильтровывали и высушивали при 100°С в течение 3 часов. Полученную шихту перетирали и прессовали образцы в виде параллелепипедов. Затем образцы обжигали при 600°С в течение 4 часов и далее при 1250°С в течение 1 часа.

Рентгенофазовый анализ образцов показал, что при введении добавок хрома и магния в рассматриваемых пределах наблюдается некоторое уменьшение параметров элементарной ячейки синтезированного гидроксиапатита.

Проведенный химический анализ образцов на содержание кальция, магния, фосфора и хрома свидетельствует о соответствии заданному составу в пределах погрешности определения.

Способ получения гидроксиапатита кальция, допированного магнием и хромом, таков, что в полученных образцах, вероятно, присутствует хром в форме как Cr(VI), так и Cr(III). Анализ содержания отдельных форм хрома не проводили, но из соображений электронейтральности решетки их соотношение должно быть следующее: Cr(VI)/Cr(III) = 1/3.

На полученных образцах изучали такие характеристики керамики, как усадка, открытая пористость, водопоглощение, кажущаяся плотность и величина прочности на изгиб.

На величину усадки образцов в процессе прокаливания содержание хрома влияет слабо: так, при увеличении содержания хрома до состава $\text{Ca}_{10}(\text{P}_{0,75}\text{Cr}_{0,25}\text{O}_4)_6(\text{OH})_2$ наблюдается рост усадки до ~6%, при дальнейшем увеличении хрома до состава $\text{Ca}_{10}(\text{P}_{0,55}\text{Cr}_{0,45}\text{O}_4)_6(\text{OH})_2$ данный параметр медленно достигает этой величины. При совместном введении магния и хрома усадка увеличивается на 6-7%, при повышении содержания магния - состав $\text{Ca}_{8,3}\text{Mg}_{1,7}(\text{P}_{0,75}\text{Cr}_{0,25}\text{O}_4)_6(\text{OH})_2$ - далее снижается.

Величина кажущейся плотности возрастает до 3,5% при составе $\text{Ca}_{10}(\text{P}_{0,65}\text{Cr}_{0,35}\text{O}_4)_6(\text{OH})_2$ и снижается до ~ 3,4% при переходе к составу $\text{Ca}_{10}(\text{P}_{0,55}\text{Cr}_{0,45}\text{O}_4)_6(\text{OH})_2$. Такая же зависимость наблюдается и в случае совместного замещения кальция и фосфора.

Водопоглощение при увеличении содержания хрома снижается от ~ 4,4% до ~ 2,3% при составе $\text{Ca}_{10}(\text{P}_{0,55}\text{Cr}_{0,45}\text{O}_4)_6(\text{OH})_2$. При совместном введении магния и хрома в состав образцов можно наблюдать близкую к линейной зависимость - снижение величины водопоглощения.

Открытая пористость увеличивается до ~ 5,6 % при составе $\text{Ca}_{10}(\text{P}_{0,85}\text{Cr}_{0,15}\text{O}_4)_6(\text{OH})_2$, затем снижается. В случае совместного введения добавок магния и хрома величина открытой пористости практически не изменяется.

Величина прочности на изгиб увеличивается до ~ 29 Мпа, при содержании хрома $\text{Ca}_{10}(\text{P}_{0,65}\text{Cr}_{0,35}\text{O}_4)_6(\text{OH})_2$, и снижается с дальнейшим ростом количества хрома до 18 Мпа - состав $\text{Ca}_{10}(\text{P}_{0,55}\text{Cr}_{0,45}\text{O}_4)_6(\text{OH})_2$.

При совместном введении магния и хрома в образец прочность на изгиб увеличивается до ~ 25 МПа - состав $\text{Ca}_{8,5}\text{Mg}_{1,5}(\text{P}_{0,75}\text{Cr}_{0,25}\text{O}_4)_6(\text{OH})_2$. Дальнейшее увеличение содержания магния и хрома ведет к снижению данного показателя.

Таким образом, магний при совместном введении с хромом в состав образцов оказывает «компенсирующее» влияние на физико-химические свойства образца: наблюдается небольшое снижение прочностных характеристик и величины усадки; несколько увеличиваются значения кажущейся плотности, открытой пористости и водопоглощения.

* * *

1. Арсеньев П.А., Комиссаренко Н.В., Старостина М.С. Медицинские и биоматериалы. М.: Изд-во МЭИ, 1999. 72 с.
2. Орловский В.П., Сливка О.И. Синтез, свойства и применение гидроксиапатита // Стоматология. 1996. № 5. С. 68-72.

Н.А. Жук, И.В. Пийр, В.Н. Филиппов
Сыктывкарский госуниверситет

К вопросу о фазовых соотношениях в системе $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$

В работе изучено фазообразование в системе $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$. Установлены границы образования твердых растворов на основе ниобатов висмута. Выявлена обширная область образования хромсодержащих ниобатов висмута со структурой типа пирохлора ($Fm\ 3m$) и определены параметры элементарной ячейки фаз с различным мольным соотношением металлов в сложном ниобате.

Сложные ниобаты висмута в последние годы привлекают к себе внимание исследователей в связи с возможностью использования материалов на их основе в современных областях радиоэлектроники. Соответственно исследование таких объектов направлено как на изучение условий синтеза, механизмов твердофазных реакций при образовании известных и используемых в микроэлектронике соединений, таких, как $\text{Bi}_2\text{ZnNb}_2\text{O}_9$ [1], так и на поиск новых композиций, обладающих интересными электрофизическими свойствами.

Особенностью сложных ниобатов висмута, содержащих атомы переходных металлов, является их кристаллизация в широком спектре структурных типов, таких, как пирохлор, фазы Ауривиллиуса и др. В бинарной системе $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$ при мольном отношении $\text{Bi/Nb} \geq 1$ известно несколько оксидных соединений BiNbO_4 , $\text{Bi}_5\text{Nb}_3\text{O}_{15}$, Bi_3NbO_7 [2-7], имеющих различное кристаллическое строение.

Одним из наиболее устойчивых соединений в бинарной системе $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$ является ортониобат висмута - BiNbO_4 , кристаллизующийся в двух структурных модификациях: низко- и высокотемпературной. Температура фазового перехода составляет 1020°C .

Ниобат висмута $\text{Bi}_5\text{Nb}_3\text{O}_{15}$ относится к семейству со слоистой перовскитоподобной структурой, построенной путем чередования висмутокислородных слоев Bi_2O_3 и перовскитовых фрагментов из связанных вершинами октаэдров NbO_6 с размещением крупных катионов висмута в кубоктаэдрических пустотах между ними. Структура данного ниобата висмута характеризуется упорядоченным чередованием фрагментов толщиной в один и два октаэдра, так что его структуру можно представить в виде $(\text{Bi}_2\text{O}_3)(\text{NbO}_4)(\text{Bi}_2\text{O}_2)(\text{BiNb}_2\text{O}_7)$ [5].

Добавление к системе $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$ определенных количеств оксидов металлов приводит к кристаллизации либо по типу пирохлора, либо слоистого перовскита в зависимости от размеров атомов металла. В случае присутствия атомов с большим ионным радиусом (Ba, Sr, Hg) кристаллизация проходит по типу слоистого перовскита. При добавлении к исходной системе атомов с меньшим ионным радиусом (атомы Mg, 3d-металлов) кристаллизуется соединение со структурой пирохло-

ра. Среди тройных соединений, содержащих в своем составе хром и кристаллизующиеся по типу пироклора, известны соединения $\text{Bi}_2\text{NbCrO}_7$, $\text{Bi}_{1.34}\text{NbCrO}_6$ [8,9]. Кристаллическая структура пироклора описывается пространственной группой $\text{Fd}\bar{3}\text{m}$ и принадлежит кубической сингонии. Данная структура характеризуется наличием жесткого трехмерного каркаса из ниобий-кислородных октаэдров, соединенных боковыми вершинами. В этом каркасе имеются пустоты, внутри которых размещены крупные катионы атомов висмута. Жесткий октаэдрический каркас устойчив и может сохраняться при существенном дефиците атомов как в подрешетке висмута, так и в подрешетке атомов кислорода.

В данной работе исследовали области существования различных кристаллических фаз в зависимости от содержания хрома в ниобатах висмута с молярным соотношением $\text{Bi/Nb} \geq 1$. Исследованные составы изображены точками внутри области концентрационного треугольника тройной системы $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (рис. 1).

С целью установления области устойчивости структурного типа пироклора в заданной системе исследованы составы $\text{BiNb}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{4\pm}$ (1), $\text{BiNbCr}_x\text{O}_{4\pm}$ (2), являющиеся результатом варьирования в сложном оксиде молярных соотношений оксидов металлов висмута, ниобия и хрома.

Синтез

Синтез сложных ниобатов висмута проводили по стандартной керамической технологии с использованием исходных оксидов марки х.ч. Bi_2O_3 , Nb_2O_5 , Cr_2O_3 . Стехиометрическую смесь исходных оксидов гомогенизировали, затем запрессовывали в виде дисков и подвергали термообработке.

Условия синтезов хромсодержащих ниобатов висмута подбирали экспериментально, использовали различные сочетания температур и временных выдержек. Оптимальные режимы синтезов, при которых получались однофазные образцы по данным РФА, отражены в таблице 1. Фазовый состав образцов определяли рентгенографически (ДРОН-4-13, $\text{CuK}\alpha$), методом электронной сканирующей микроскопии (спектрометр фирмы Linc, электронный микроскоп JSM 6400).

Обсуждение результатов

Исследованные составы (табл. 1) представлены точками на концентрационном треугольнике тройной системы $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (рис. 1).

На основании рентгенографического исследования синтезированных образцов установлено образование твердых растворов состава $\text{BiNb}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ с концентрацией хрома $x \leq 0.05$, кристаллизующихся в структурном типе низкотемпературного ниобата висмута. Твердые растворы высокотемпературного ниобата висмута получены в результате прокаливания при температуре 1050 $^\circ\text{C}$.

Области твердых растворов, полученные путем замещения в соединении атомов ниобия на хром, на треугольнике показаны отрезками, исходящими от соответствующих исходных соединений $\text{Bi}_5\text{Nb}_3\text{O}_{15}$, BiNbO_4 , Bi_3NbO_7 (рис. 1, табл. 1).

Установлено, что образцы $\text{BiNb}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ с содержанием хрома $0.3 \leq x \leq 0.6$ кристаллизуются в структурном типе пирохлора и являются однофазными, тогда как на дифрактограммах образцов, содержание хрома в которых соответствует $x \approx 0.7$, присутствуют рефлексы структуры BiCrO_3 .

Примечательным является тот факт, что не только частичное замещение атомов ниобия хромом в соединениях, отвечающих ряду (1) $\text{BiNb}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$, но и дополнительное добавление атомов хрома в подрешетку ниобия сверх стехиометрического количества по отношению к стехиометрии ортониобата висмута $\text{BiNbCr}_x\text{O}_4$ (ряд 2) приводит к кристаллизации соединений данного состава в структурном типе пирохлора. Если образование сложных ниобатов висмута со структурой типа пирохлора происходит в небольшом концентрационном интервале атома заместителя хрома, то в случае составов, соответствующих ряду 2 (рис. 1), образование данной структуры наблюдается в достаточно обширном интервале концентраций хрома $0.3x \leq 1.5$. При меньших значениях $x < 0.3$ составы двухфазны и представляют собой смесь фаз со структурой пирохлора и BiNbO_4 , при $x > 1.5$ образуются фазы NbCrO_4 и Cr_2O_3 . Заретушированные точки на концентрационном треугольнике соответствуют однофазным составам, имеющим структуру пирохлора. Параметры кристаллической решетки однофазных составов приведены в таблице 2. Существование хромсодержащих сложных ниобатов, кристаллизующихся в структурном типе пирохлора в обширном диапазоне молярных соотношений $0.66d \approx n(\text{Bi})/n(\text{Nb;Cr})d \approx 1$, оказывается возможным вследствие устойчивости дефектной структуры пирохлора (при наличии большого числа вакансий в подрешетке висмута и кислорода) [10].

Установлено образование твердых растворов состава $\text{Bi}_5\text{Nb}_{3-x}\text{Cr}_x\text{O}_{15 \pm \Delta}$ в области значений индекса $0d \approx x \approx 0.24$. При дальнейшем увеличении концентрации хрома в интервале $1 \leq x \leq 1.5$ образцы неоднородны, на рентгенограммах препаратов прослеживаются рефлексы структур ниобата висмута $\text{Bi}_5\text{Nb}_3\text{O}_{15}$ и пирохлора состава $\text{Bi}_2\text{NbCrO}_7$. Следует отметить, что симметрия медленно охлажденных образцов, как и $\text{Bi}_5\text{Nb}_3\text{O}_{15}$, является тетрагональной, тогда как при закалке полученных твердых растворов получают образцы с моноклинным искажением симметрии кристаллической решетки.

Таким образом, определены области существования твердых растворов на основе ниобатов висмута $\text{Bi}_5\text{Nb}_{3-x}\text{Cr}_x\text{O}_{15 \pm \Delta}$, $\text{BiNb}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ с концентрацией хрома $x \leq 0.24$ и $x \leq 0.05$ соответственно. Твердые растворы на основе ортониобата висмута образуются в существенно меньшем концентрационном интервале замещения атомов ниобия атомами хрома.

Установлено существование обширной области хромсодержащих ниобатов висмута со структурой пирохлора. Исследование показало, что структура пирохлора устойчива в хромсодержащих ниобатах висмута при мольном соотношении атомов висмута и переходного металла, отвечающих интервалу $0,61d^n(\text{Bi})/n(\text{Nb}+\text{Cr})d^n1$.

* * *

1. Xiaoli Wang, Hong Wang, Xi Yao // J. Am. Ceram. Soc., 1997, V 80, p. 2745-2748.
2. Roth R.S., Waring J.L. // J. Res. Nat. Bur. Stand. Sec. A., 1962, V. 66. № 6. P. 451-463.
3. M. A. Subramanian, J.C. Calabrese // Mat. Res. Bull., 1993, Vol 28. pp 523-529.
4. Keve E.T., Skapski A.C. // J. Solid State Chemistry. 8. 159-165.
5. Яновский В.К., Воронкова В.И., Водолазская И.В. // Неорг. матер. 1990. Т. 26. № 6. С. 1297-1299.
6. Castro A., Aguado E., Rojo J.M., Herrero P., Galy J. // Mat. Res. Bull. 1998. 33. 31-41.
7. A.M. Kusainova, S.Yu. Stefanovich, V.A. Dolgikh, A.V. Mosunov, C.H. Hervoches, P. Lightfoot // J. Mat. Chem., 2001, 11, 1141-1145.
8. M. Valant, D. Suvorov // J. Am. Ceram. Soc., 2003. 86 [6] 939-944.
9. Bernard D., Pannetier J., Lucas J. // Ferroelectrics. 1978., Vol.21, P. 429-435.
10. I.V. Piir, D.A. Prikhodko, S.V. Ignatchenko, A.V. Schukariov // Sol. St. Ion., 1997, 1141-1146.

Приложение

Таблица 1
Фазовый состав, условия синтеза исследованных образцов

№	n(Bi)/(n(Nb)+n(Cr))	Состав	Bi2O3	Nb2O5	Cr2O3	Т синтеза, К (t,ч.)	Состав (РФА) структура
			мол.%	мол.%	мол.%		
I.1.0	3,00	Bi3NbO7	75	25		920(25)	Bi3NbO7(куб)
I.1.1	3,00	Bi3Nb1-xCrхO7	75	24.88	0.12		Bi3NbO7(куб)
		x=0,005				920 (50)	
I.1.2	3,00	Bi3Nb1-xCrхO7	75	23	2		Bi3NbO7(куб)
		x=0,08				920 (50)	
I.1.3	3,00	Bi3Nb1-xCrхO7	75	22.5	2.5		Bi3NbO7(куб)
		x=0,1				920 (50)	
I.2.1	1,50	Bi3NbCrO8,5	60	20	20		пироклор
						920 (50)	Bi2O3
I.2.2	1	Bi3Nb2CrO11	50	33.33	16.67		пироклор
						920 (50)	
I.2.3	1	Bi2NbCrO7	50	25	25		пироклор
						920 (50)	
II.1.0	1,67	Bi5Nb3O15	62,5	37,5			
						920(25)	Bi5Nb3O15
II.1.1	1,67	Bi5Nb3-xCrхO15	62.5	37.31	0.19		
		x=0,15				920(25)	Bi5Nb3O15
II.1.2	1,67	Bi5Nb3-xCrхO15	62.5	37.12	0.38		
		x=0,03				920(25)	Bi5Nb3O15
II.1.3	1,67	Bi5Nb3-xCrхO15	62.5	36.94	0.56		
		x=0,045				920(25)	Bi5Nb3O15
II.1.4	1,67	Bi5Nb3-xCrхO15	62.5	36.75	0.75		
		x=0,06				920(25)	Bi5Nb3O15
II.1.5	1,67	Bi5Nb3-xCrхO15	62.5	36.38	1.12		
		x=0,09				920(25)	Bi5Nb3O15
II.1.6	1,67	Bi5Nb3-xCrхO15	62.5	36	1.5		
		x=0,12				920(25)	Bi5Nb3O15
II.1.7	1,67	Bi5Nb3-xCrхO15	62.5	35.25	2.25		
		x=0,18				920(25)	Bi5Nb3O15
II.1.8	1,67	Bi5Nb3-xCrхO15	62.5	34.5	3		
		x=0,24				920(25)	Bi5Nb3O15
II.1.9	1,67	Bi5Nb3-xCrхO15	62.5	33.75	3.75		Cr2O3
		x=0,3				920(25)	Bi5Nb3O15
II.2.1	1,025	Bi5Nb3CrO16,5	55.56	33.33	11.11		Bi5Nb3O15 пироклор
II.2.2	1,67	Bi5Nb2CrO14	62,5	25	12,5		Bi5Nb3O15
						920(25)	пироклор
III.1.0	1	BiNbO4	50	50			BiNbO4(HT)
						1030(10)	BiNbO4(BT)
III.1.1	1	BiNb1-xCrхO4	50	49,75	0,25		BiNbO4(HT)
		x=0,005				1050(20)	BiNbO4(BT)

Окончание табл. 1

№	$n(\text{Bi})/(n(\text{Nb})+n(\text{Cr}))$	Состав	Bi_2O_3	Nb_2O_5	Cr_2O_3	Т синтеза, К (t, ч.)	Состав (PФА) структура
			мол. %	мол. %	мол. %		
III.1.2	1	$\text{BiNb}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$	50	49,5	0,5	950(50)	$\text{BiNbO}_4(\text{HT})$
		$x=0,01$				1050(20)	$\text{BiNbO}_4(\text{BT})$
III.1.3	1	$\text{BiNb}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$	50	49,25	0,75	950(50)	$\text{BiNbO}_4(\text{HT})$
		$x=0,015$				1050(20)	$\text{Bi}_5\text{Nb}_3\text{O}_{15}$
III.1.4	1	$\text{BiNb}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$	50	49	1	950(50)	$\text{BiNbO}_4(\text{HT})$
		$x=0,02$				1050(20)	$\text{BiNbO}_4(\text{BT})$
III.1.5	1	$\text{BiNb}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$	50	48,5	1,5	950(50)	$\text{BiNbO}_4(\text{HT})$
		$x=0,03$				1050(20)	$\text{BiNbO}_4(\text{BT})$
III.1.6	1	$\text{BiNb}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$	50	48	2	950(50)	$\text{BiNbO}_4(\text{HT})$
		$x=0,04$				1050(20)	$\text{BiNbO}_4(\text{BT})$
III.1.7	1	$\text{BiNb}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$	50	47,5	2,5	950(50)	$\text{BiNbO}_4(\text{HT})$
		$x=0,05$				1050(20)	$\text{BiNbO}_4(\text{BT})$
III.1.8	1	$\text{BiNb}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$	50	45	5	950(50)	$\text{BiNbO}_4(\text{HT})$
		$x=0,1$					Cr_2O_3
III.1.9	1	$\text{BiNb}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$	50	35	15	950(50)	
		$x=0,3$					пирохлор
III.1.10	1	$\text{BiNb}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$	50	25	25	950(50)	
		$x=0,5$					пирохлор
III.2.1	0.83	$\text{BiNbCr}_x\text{O}_4$	45,45	45,45	9,10	950(50)	пирохлор
		$x=0,2$					
III.2.2	0.67	$\text{BiNbCr}_x\text{O}_4$	40	40	20	950(50)	пирохлор
		$x=0,5$					
III.2.3	0.5	$\text{BiNbCr}_x\text{O}_4$	33,33	33,33	33,33	950(50)	пирохлор
		$x=1$					
III.2.4	0.4	$\text{BiNbCr}_x\text{O}_4$	28,57	28,57	42,86	950(50)	пирохлор
		$x=1,5$					
III.2.5	0.33	$\text{BiNbCr}_x\text{O}_4$	25	25	50	1000(50)	пирохлор
		$x=2$					Cr_2O_3

Таблица 2

Параметр кристаллической ячейки (a) соединений со структурой пироклора (Fd3m)

Состав	Параметр решетки, a (Å)
$\text{Bi}_2\text{NbCrO}_7$	10.470
$\text{Bi}_3\text{Nb}_2\text{CrO}_{11}$	10.467
$\text{BiNbCr}_{0.5}\text{O}_{4.75}$	10.469
$\text{BiNbCr}_{0.8}\text{O}_{5.2}$	10.473
$\text{BiNbCrO}_{5.5}$	10.471
$\text{BiNbCr}_{1.5}\text{O}_{6.25}$	10.470
$\text{Bi}_2\text{NbCr}_2\text{O}_{4.25}$	10.462
$\text{Bi}_{4/3}\text{CrNbO}_6$	10.466
$\text{BiCrNb}_{4/3}\text{O}_{6.3}$	10.469

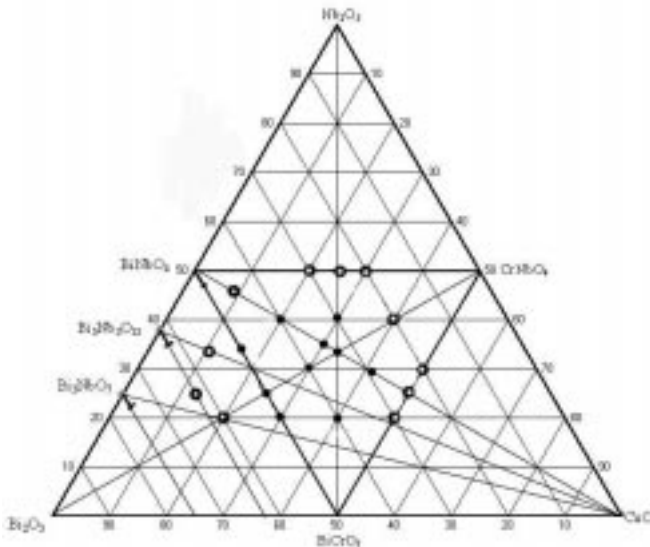


Рис. 1. Диаграмма тройной системы $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$

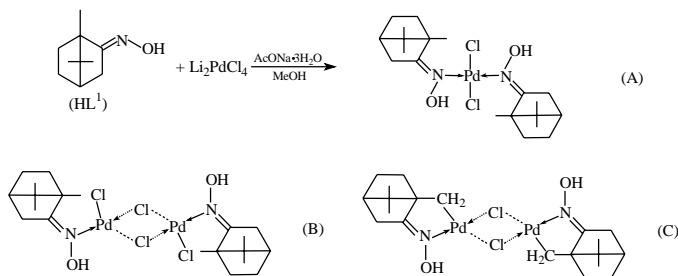
О.А. Залевская, О.Н. Конева, А.В. Кучин
Сыктывкарский госуниверситет

Хиральные комплексы палладия на основе природных монотерпеноидов. Палладирование оксима (1S)-(-)-камфоры

Хиральные комплексы палладия представляют интерес с точки зрения получения новых оптически активных соединений, обладающих специфической биологической активностью. В настоящее время известны достижения в применении оптически активных палладоциклов в процессах хирального распознавания различного типа: для разделения энантиомеров широкого круга субстратов, обладающих лигандными свойствами; в качестве эффективных индукторов хиральности в энантиоселективном катализе и матриц для асимметрического синтеза.

Наиболее оптимальный путь получения хиральных комплексов палладия – это использование в качестве лигандов азотсодержащих производных природных оптически активных соединений. Такой подход существенно упрощает синтетическую схему: исходными матрицами являются доступные недорогие оптически чистые бициклические монотерпены (такие, как камфора, альфа-пинен); с помощью классических отработанных методик осуществляется их химическая модификация с целью введения N-донорного центра; полученные таким образом лиганды могут быть использованы для синтеза комплексов палладия различного типа. В настоящей работе представлены результаты исследования реакции палладирования оксима камфоры (HL¹). Данный лиганд получен из (1S)-(-)-камфоры по описанной методике с выходом 80 % [1]. Удельное вращение составляет +37,9° (этанол), что соответствует 93-процентной оптической чистоте.

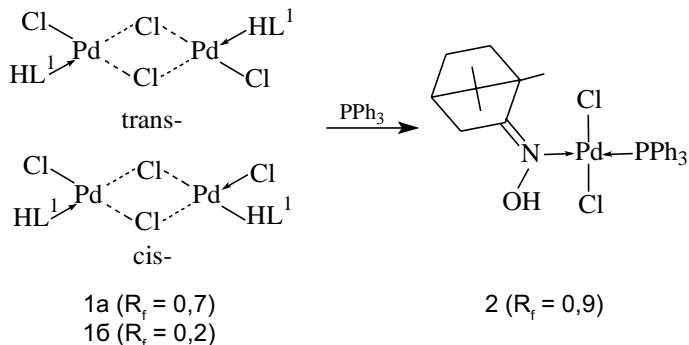
В качестве палладирующего агента использовали тетрахлоропалладат лития, который получали кипячением смеси хлорида лития и хлорида палладия (в соотношении 1:2) в метаноле. Схема взаимодействия камфороксиима с тетрахлоропалладатом лития может быть представлена следующим образом:



Согласно литературным данным, оксимы сравнительно легко образуют комплексы с палладием [2]. Возможно образование различных соединений: простого координационного комплекса (А) и координационного димерного комплекса (В). При этом в каждом случае не исключена цис-транс-изомерия. Мы предполагали также возможность циклопалладирования по метильной группе в первом положении (структура С). С целью обеспечения условий для циклопалладирования комплексообразование проводили методом Коупа-Фридриха [3] – прямым палладированием исходного лиганда тетрахлорпалладатом лития в метаноле в присутствии трехводного ацетата натрия в качестве основания при мольном соотношении реагентов 1:1. Палладирование камфороксиима проводили без нагревания, т.к. при нагревании наблюдается выделение палладиевой черни. Хроматографически зафиксировано образование двух комплексных соединений, выделение которых из реакционной смеси осуществляли с помощью колоночной хроматографии (силикагель; бензол: ацетон 5:1). Таким образом было получено два продукта – кристаллические вещества желтого цвета с различной хроматографической подвижностью: $R_f = 0,7$ (комплекс 1а), $R_f = 0,2$ (комплекс 1б). Дополнительную очистку их проводили методом перекристаллизации из системы бензол-гексан.

Для установления строения полученных соединений были сняты спектры ЯМР H^1 и C^{13} . Однако спектры имеют сложный характер для интерпретации. Это может быть связано с образованием смеси стереоизомеров. Поэтому для упрощения структуры были получены соответствующие трифенилфосфиновые производные комплексов 1а и 1б. Этот прием часто используется в химии комплексных соединений. Из литературы известно, что для димеров, содержащих хлоридные мостики, характерна реакция с дополнительным лигандом – трифенилфосфином, в результате которой идет раскрытие хлоридных мостиков. При добавлении трифенилфосфина к суспензии комплекса 1а в бензоле наблюдалось растворение исходного комплекса и изменение окраски раствора от желто-оранжевой до бледно-желтой. Кристаллизацией из системы бензол-гексан было получено кристаллическое соединение (комплекс 2а) бледно-желтого цвета с $R_f = 0,9$ (SiO_2 , бензол: ацетон 5:1). При добавлении трифенилфосфина к суспензии комплекса 1б в бензоле наблюдались аналогичные изменения. Кристаллизацией было получено кристаллическое соединение (комплекс 2б) бледно-желтого цвета с $R_f = 0,9$ (SiO_2 , бензол: ацетон 5:1). Полученные трифенилфосфиновые производные 2а и 2б имеют одинаковую хроматографическую подвижность и практически одинаковые ИК-спектры, что свидетельствует об их идентичности (в дальнейшем комплекс 2). Такой результат позволяет заключить, что исходные комплексы 1а и 1б, полученные при прямом палладировании камфороксиима, представляют собой геометрические изомеры координационного димерного комплекса, со-

держашего хлоридные мостики, а схема взаимодействия с трифенилфосфином может быть представлена следующим образом:



Предполагаемое строение полученного смешаннолигандного комплекса палладия, содержащего координационно связанный оксим камфоры, подтверждается методами ЯМР и ИК-спектроскопии. В спектре ПМР комплекса 2 не зафиксировано изменений в положении и интенсивности сигналов алифатических групп по сравнению со спектром свободного лиганда (рис. 1).

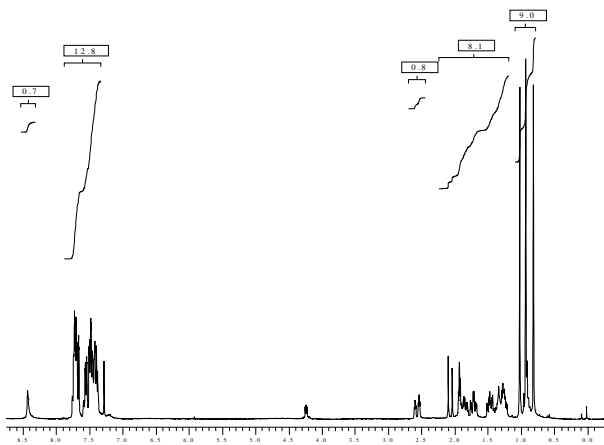


Рис. 1. Спектр ПМР комплекса 2

Существенное смещение от 9,43 м.д. (в спектре свободного лиганда) до 8,43 м.д. (в спектре комплекса 2) претерпевает только сигнал, соответствующий протону гидроксильной группы, что может быть следствием координационного связывания оксима. Трифенилфосфиновый

лиганд идентифицируется в спектре ПМР как мультиплет в области 7,28-7,76 м.д. с интегральной интенсивностью 15 Н. Таким образом, спектр ПМР не противоречит предполагаемой структуре.

В ИК-спектре полученного комплекса наблюдается смещение валентных колебаний связей ОН к высоким волновым числам от 3320 см⁻¹ в свободном лиганде до 3436 см⁻¹ в комплексе, тогда как валентные колебания группы >C=N- смещаются к более низким частотам (от 1692 см⁻¹ в спектре свободного лиганда до 1632 см⁻¹ в спектре комплекса 2). Согласно литературным данным, такие смещения характерны для N-донорных комплексов оксимов [2].

В пользу обсуждаемых структур свидетельствуют данные, полученные методом молекулярного моделирования с помощью программы Hyper Chem (рис.2).

(B)

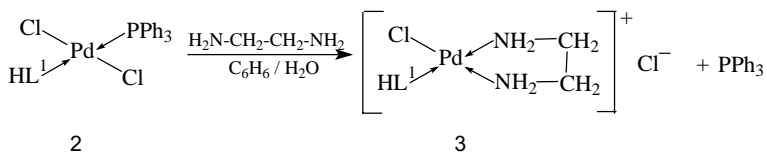
(C)

(2)

Рис. 2. Модели комплексов палладия, полученные с помощью компьютерной программы Hyper Chem

Самая высокая энергия напряжения отмечается в случае циклопалладированной структуры С (409 ккал/моль). Координационные димерные комплексы типа В более устойчивы, и переход от комплексов типа В к соответствующим трифенилфосфиновым моноядерным производным сопровождается существенным уменьшением энергии напряжения комплексного соединения (от 365 ккал/моль до 42 ккал/моль).

Получение координационного соединения 2 возможно без хроматографического разделения исходных димерных комплексов 1а и 1б, что существенно упрощает схему получения данного хирального комплекса. Легкость взаимодействия димерных комплексов с дополнительным лигандом, а также возможность лигандного обмена позволяют получать различные моноядерные производные. Таким образом, изучаемая схема получения хиральных комплексов палладия является универсальной. В частности, нами была показана возможность получения водорастворимых комплексов данного типа, что весьма важно с точки зрения изучения и использования их как физиологически активных соединений. При взаимодействии комплекса 2 с этилендиамином происходит образование ионного водорастворимого комплекса 3:



Замещение трифенилфосфинового лиганда подтверждено с помощью тонкослойной хроматографии.

* * *

1. Вейганд К. Методы эксперимента в органической химии. М.: ИЛ, 1952. Ч. 2. С. 289.
2. Grigor B.A., Nielson A.J. J. Organomet. Chem., 132, 439 (1977).
3. Cope A.C., Friedrich E.C. J. Am. Chem.Soc., 90, 909 (1968).

**Д.В. Белых¹, Л.А. Тулаева², Е.В. Холопова¹,
И.А. Селькова², М.И. Кодесс³, А.В. Кучин¹**

¹ Институт химии Коми научного центра УрО РАН,

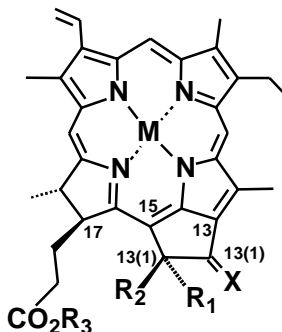
² Сыктывкарский госуниверситет,

³ Институт органического синтеза УрО РАН, Екатеринбург

Синтез и реакции цинкового комплекса метилфеофорбида (а)

Синтезирован цинковый комплекс метилфеофорбида (а) и исследованы реакции 13(1)-карбонильной группы экзоцикла с нуклеофильными агентами. Установлено, что введение цинка в координационную сферу метилфеофорбида (а) приводит к уменьшению реакционной способности экзоцикла этого соединения в реакциях 13(1)-карбонильной группы, протекающих с образованием отрицательно заряженных промежуточных частиц. Наблюдаемое уменьшение реакционной способности в таких реакциях объясняется увеличением электронной плотности на 13(1)-карбонильном атоме углерода. Уменьшение реакционной способности экзоцикла при введении металла в сочетании с легкостью демеаллирования комплекса может быть использовано для защиты экзоцикла при различных химических превращениях метилфеофорбида (а).

Превращения производных хлорофилла представляют большой интерес в связи с использованием подобных соединений в медицине. Экзоцикл метилфеофорбида (а) (1) и сходных с ним форбиновых производных является реакционноспособным фрагментом, в реакциях которого проявляются все особенности стерически затрудненных β-кетозэфиров (см., например, [1,2]). Введение металла в координационную сферу метилфеофорбида (а) должно изменять реакционную способность экзоцикла этого соединения. Известно, что цинковые комплексы производных хлорофилла легко демеаллируются с образованием безметалльных хлоринов.



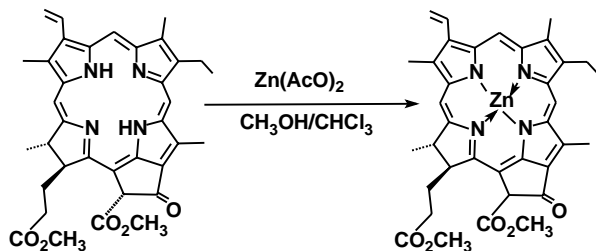
- (1) метилфеофорбид (а): $M = 2H; X = O; R_1 = CO_2CH_3; R_2 = H; R_3 = CH_3$;
(2) 13(2)-гидроксиметилфеофорбид (а): $M = 2H; X = O; R_1, R_2 = CO_2CH_3, OH; R_3 = CH_3$;
(3) метилпирофеофорбид (а): $M = 2H; X = O; R_1 = R_2 = H; R_3 = CH_3$;
(4) цинковый комплекс метилфеофорбида (а): $M = Zn; X = O; R_1 = CO_2CH_3; R_2 = H$; (5) цинковый комплекс 13(2)-гидроксиметилфеофорбида (а): $M = Zn; X = O; R_1, R_2 = CO_2CH_3, OH; R_3 = CH_3$;
(6) цинковый комплекс метилпирофеофорбида (а): $M = Zn; X = O; R_1 = R_2 = H; R_3 = CH_3$;
(7) феофорбид (а) $M = 2H; X = O; R_1 = CO_2CH_3; R_2 = H; R_3 = CH_3$;
(8) оксим метилфеофорбида (а) $M = 2H; X = NOH; R_1 = CO_2CH_3; R_2 = H; R_3 = CH_3$;
(9) цинковый комплекс оксима метилфеофорбида (а) $M = Zn; X = NOH; R_1 = CO_2CH_3; R_2 = H; R_3 = CH_3$;
(10) 13(1)-дезоксо-13(1)-гидроксид-метилфеофорбид (а) $M = 2H; X = H, OH; R_1 = CO_2CH_3; R_2 = H; R_3 = CH_3$;
(11) цинковый комплекс 13(1)-дезоксо-13(1)-гидроксид-метилфеофорбида (а) $M = Zn; X = H, OH; R_1 = CO_2CH_3; R_2 = H; R_3 = CH_3$;
(12) цинковый комплекс метилпирофеофорбида (а) $M = Zn; X = O; R_1 = R_2 = H; R_3 = CH_3$.

В случае, если введение цинка в координационную сферу метилфеофорбида (а) приведет к увеличению реакционной способности его экзацикла, образование цинкового комплекса метилфеофорбида (а) может быть использовано для модификации метилфеофорбида (а). При относительной легкости диметаллирования цинковых комплексов хлоринов обратный эффект может быть использован для защиты экзацикла от нежелательных превращений при химической модификации таких форбиновых производных. Таким образом, целью настоящей работы является синтез цинкового комплекса метилфеофорбида (а) и исследование реакционной способности полученного комплекса.

Результаты и их обсуждение

Синтез цинкового комплекса метилфеофорбида (а)

Метилфеофорбид (а) был получен из крапивы согласно методике [1]. Строение полученного соединения было подтверждено данными ПМР-спектроскопии. Цинковый комплекс метилфеофорбида (а) (4) синтезирован по методике, аналогичной описанной в литературе для синтеза металлокомплекса производных хлорофилла Cu(II), Zn(II) [4, 5]. Реакцию осуществляли действием ацетата цинка на метилфеофорбид (а) (1) в смеси хлороформа с метанолом при комнатной температуре.



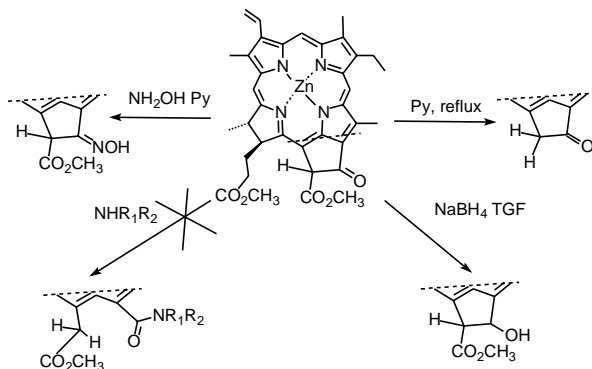
Колоночной хроматографией на силикагеле из реакционной смеси был выделен цинковый комплекс метилфеофорбида (а) (**4**) и цинковый комплекс 13(2)-гидрокси-метилфеофорбида (а) (**5**). Спектр ПМР комплекса (**4**) усложнен, по-видимому, вследствие его склонности к агрегации в растворе, аналогичной описанной в [3]. Тем не менее отсутствие сигналов NH-протонов в спектре ПМР подтверждает образование комплекса. Строение комплекса (**4**) следует из данных электронной спектроскопии и изучения реакции его деме­таллирования. Сравнение ЭСП метилфеофорбида (а) и продукта реакции показывает, что в спектре последнего происходит смещение максимума поглощения полосы I в видимой области на 17 нм в коротковолновую область (651 нм для цинкового комплекса метилфеофорбида (а) и 668 нм для исходного лиган­да) и исчезновение полос поглощения при 507 и 537 нм в видимой области спектра. Такие изменения ЭСП свидетельствуют о внедрении Zn в координационную сферу порфирина. Деметаллирование полученного комплекса в смеси ТГФ с концентрированной соляной кислотой дает с высоким выходом только метилфеофорбид (а) с небольшой приме­сью феофорбида (а) (**7**), образующегося в результате гидролиза слож­ноэфирной группы в положении хлорина (**1**).

Строение комплекса (**5**) подтверждено данными электронной и ЯМР-спектроскопии, а также результатами изучения реакции его де­металлирования. Как и в случае комплекса (**4**), изучение соединения (**5**) методом электронной спектроскопии позволяет выявить измене­ния, происходящие при введении цинка в координационную сферу хло­рина, а именно: в спектре комплекса происходит смещение максима поглощения полосы I в коротковолновую область на 13 нм (655 нм для цинкового комплекса 13 (2)-гидроксиметилфеофорбида (а) и 668 нм для 13 (2)-гидроксиметилфеофорбида (а) и исчезновение полос поглощения при 505 и 534 нм в видимой области спектра, что свиде­тельствует о внедрении цинка в координационную сферу хлорина. Ис­следование комплекса (**5**) методом ПМР показывает, что изучаемое соединение является смесью диастереомеров, отличающихся конфи­гурацией асимметрического атома в положении 13 (2). В спектре ПМР исследуемого соединения наблюдаются сигналы тех же групп, что и в смеси диастереомеров 13 (2)-гидроксиметилфеофорбида (а), за исклю­

чением сигналов NH-протонов. Деметаллирование исследуемого соединения в смеси ТГФ с концентрированной соляной кислотой приводит к образованию 13(2)-гидроксиметилфеофорбида (а) (2). Идентичное по хроматографической подвижности (в условиях ТСХ) и сходное по спектру ПМР соединение образуется при действии ацетата цинка на один из диастереомеров 13 (2)-гидроксиметилфеофорбида (а). Таким образом, перечисленные выше данные свидетельствуют о том, что при действии ацетата цинка на лиганд (1) помимо целевого продукта образуется цинковый комплекс 13 (2)-гидроксиметилфеофорбида (а) (5).

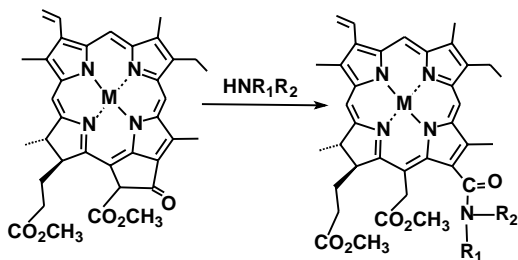
Реакции цинкового комплекса

Исследованные в настоящей работе нуклеофильные реакции с участием 13 (1)-карбонильной группы можно представить следующей схемой:



Реакция с аминами и гидросиламином

Введение металла в координационную сферу метилфеофорбида (а) (1) должно изменять реакционную способность экзоцикла этого соединения, в том числе в реакции с аминами при получении различных амидов:



где $M = 2\text{H}$ или ион металла.

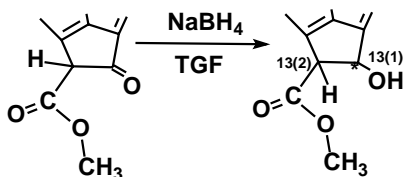
Реакция идет по механизму нуклеофильного замещения при карбонильном атоме углерода в положении 13 (1). Известно, что цинковые комплексы производных хлорофилла легко деметаллируются с образованием безметалльных хлоринов. Реакционная способность соединения (1) в приведенной выше реакции недостаточна для того, чтобы таким образом вводить на периферию хлоринового цикла любой необходимый заместитель. Основным ограничителем ее являются стерические факторы. Так, форбин (1) хорошо и с высоким выходом реагирует с метиламином, бензиламином, этаноламином, этилендиамином, диметиламином, диэтиламином морфолином, в то же время осуществить такую реакцию, например, с третбутиламином или дибутиламином в тех же условиях не удастся. В случае, если введение цинка в координационную сферу метилфеофорбида (а) увеличит реакционную способность его экзоцикла в реакции с аминами, цинковый комплекс метилфеофорбида (а) может быть использован для синтеза амидов в тех случаях, когда это невозможно сделать, используя метилфеофорбид (а). Введение цинка в координационную сферу хлоринов из хлорофилла приводит к увеличению электронной плотности на периферических заместителях (см., например, [4]), что, напротив, должно уменьшать реакционную способность соединения в рассматриваемой реакции. Поэтому увеличение реакционной способности цинкового комплекса по сравнению с безметалльным метилфеофорбидом (а) в реакции с аминами можно ожидать, только за счет увеличения стерической напряженности экзоцикла. Исследование взаимодействия цинкового комплекса метилфеофорбида (а) с различными аминами (метиламин, диметиламин, этаноламин, диэтиламин) показывает, что полученное соединение не реагирует с теми аминами, с которыми реагирует исходный безметалльный метилфеофорбид (а) (1). Таким образом, введение цинка в координационную сферу метилфеофорбида (а) понижает реакционную способность экзоцикла в реакции с аминами. Аналогичное понижение реакционной способности наблюдается также в реакции с гидроксиламином. В то время как безметалльный метилфеофорбид (а) достаточно быстро реагирует с гидроксиламином с образованием оксима (8) (нагрев 1 до 100°C с хлоридом гидроксиламина в пиридине в течение 10 минут, конверсия больше 90%), реакция с цинковым комплексом (4) за это время в тех же условиях практически не проходит. Заметной конверсии комплекса (4) удалось достичь только после полуторачасового кипячения реакционной смеси, причем в результате образовывалась смесь как минимум из четырех веществ (ТСХ). Среди них был идентифицирован и искомый оксим (9), причем его содержание в реакционной смеси было невелико (цинковый комплекс оксима метилфеофорбида (а) (9) был синтезирован исходя из 8 в тех же условиях, что и комплекс (4); интересно отметить, что комплекс (9) образуется значительно быстрее, чем комплексы (4) и (5): время реакции

порядка 10-15 минут в случае с **9** вместо 1-1,5 часов для комплексов (**4**) и (**5**).

По-видимому, влияние на реакционную способность экзоцикла и в реакции с аминами, и в реакции с гидроксиламином наибольший вклад вносит увеличение электронной плотности на карбонильном атоме углерода в положении 13 (1), и возможное увеличение напряженности экзоцикла не так значимо. Кроме того, снижать скорость реакции с аминами может склонность молекул комплекса (**4**) к агрегации.

Восстановление борогидридом натрия

Аналогичное уменьшение реакционной способности наблюдается в реакции восстановления борогидридом натрия. Сам метилфеофорбид (а) (**1**) восстанавливается, образуя соответствующее 13 (1)-гидроксипроизводное (**10**) с неплохим выходом. Восстановление проводили при добавлении борогидрида натрия к раствору **1** в ТГФ при комнатной температуре в течение 1 часа, выход порядка 30-40 %; восстановление происходит не стереоселективно, образуется смесь диастереомеров, отличающихся конфигурацией асимметрического атома углерода в положении 13 (1):

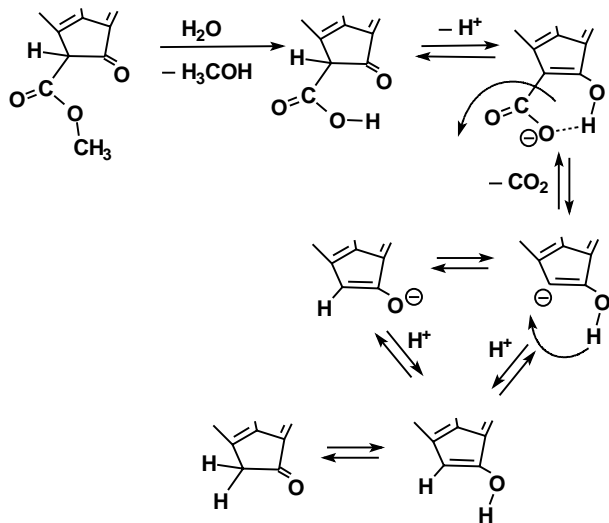


В случае комплекса (**4**) реакция в тех же условиях проходит значительно медленнее, в результате образуется смесь веществ, содержание целевого продукта (**11**) в котором очень низко (комплекс **11** был идентифицирован в образовавшейся реакционной смеси методом ТСХ, эталон комплекса **11** был получен из **10** аналогично комплексу **4**). В случае восстановления борогидридом натрия понижение реакционной способности также может быть объяснено повышением электронной плотности на карбонильном атоме углерода в положении 13(1) и склонностью комплекса к агрегации.

Декарбоксилирование

Известно, что метилфеофорбид (а) (**1**) и другие форбиновые производные хлорофиллов, имеющие такие же заместители в экзоцикле, при кипячении в пиридине декарбоксилируются с образованием так называемых пиропроизводных. Метилфеофорбид (а) (**1**) декарбоксилируется с образованием соответствующего пиропроизводного (**3**) при кипячении в пиридине в течение 4-5 часов с выходом **3** не менее 80 % и

полной конверсией исходного вещества. В случае комплекса **(4)** заметной конверсии удается добиться только после 10 часов кипячения в пиридине, причем образуется смесь веществ с небольшим содержанием пиро-производного **(12)**. Наличие в реакционной смеси комплекса **(12)** было обнаружено при исследовании продуктов деме­таллирования комплексов, содержащихся в реакционной смеси. В смеси безметалльных хлоринов, полученных при деме­таллировании смеси комплексов, был обнаружен метилпирофеофорбид (а) **(3)** (предварительно было установлено, что комплекс **(12)**, полученный исходя из **3**, деме­таллируется в этих условиях без изменения лиганда с образованием **3**). Понижение реакционной способности комплекса **(4)** по сравнению с безметалльным метилфеофорбидом (а) **(3)** обусловлено, по-видимому, главным образом повышением электронной плотности на периферии хлоринового цикла при введении атома цинка в координационную сферу хлорина. Поскольку декарбосилирование таких соединений происходит, по-видимому, через образование промежуточного карбаниона, увеличение электронной плотности на периферии хлоринового цикла дестабилизирует отрицательно заряженную промежуточную частицу:



Таким образом, введение цинка в координационную сферу метилфеофорбида (а) приводит к уменьшению реакционной способности этого соединения в нуклеофильных реакциях с участием 13(1)-карбонильной группы. Наблюдаемое уменьшение реакционной способности в таких реакциях связано, во-первых, с увеличением электронной плотности на карбонильном атоме углерода и, во-вторых, с участием комп-

лекса (4) в агрегационных процессах. Уменьшение реакционной способности экзацикла может быть в принципе использовано для защиты экзацикла при различных химических превращениях метилфеофорбида (а).

* * *

1. Порфирины: структура, свойства, синтез / Под ред. Н.С. Ениколопан. М: Наука, 1985. 334 с.
2. Synthesis of chlorine e_6 amide derivatives. L.P. Karmanova, L.V. Spirikhin A.V. Kutchin // Mendeleev Communication (2002) p. 77-78.
3. Tamiaki H., Miyatake T., Tanikaga R. Self-aggregation of synthetic zinc chlorins possessing «invers» keto-hydroxyl groups // Tetrahedron Lett. (1997) vol. 38, № 2, p.267-270.
4. Pandey R.K., Shiao F.U., Smith N.N., Dougherty D.J., Smith K.M. Synthesis of water-soluble cationic porphyrins and chlorins // Tetrahedron (1992) v. 48, № 36, p .7591-7600.
5. Brantley S.E., Gerlach B., Olmstead M.M., Smith K.M. Vinyl group protection in porphyrins and chlorins: organoselenium derivatives // Tetrahedron Lett. (1997) v. 38., № 6, p. 937-940.

Биология

М.М. Долгин, Л.И. Акулова, А.А. Таскаева
Сыктывкарский госуниверситет

Влияние газопровода на почвенных беспозвоночных

Приводятся данные об изменении структуры населения почвообитающих беспозвоночных животных, уменьшении их видового разнообразия и численности в зоне действующего газопровода.

Биоиндикация является одним из основных методов оценки антропогенного воздействия на окружающую среду. В качестве биоиндикаторов состояния почвенной среды лучше всего подходят беспозвоночные, для которых характерно значительное таксономическое разнообразие, высокая численность, относительно длительные периоды эмбрионального и постэмбрионального развития, отсутствие резких колебаний численности половозрелых форм, малая подвижность (Криволицкий, 1965). Они чутко реагируют на изменения условий обитания, о чем свидетельствуют изменения в их численности, структуре населения и видовом разнообразии (Криволицкий, 1994). В биоиндикации почвенной среды можно использовать как мезофауну, включающую сравнительно крупных членистоногих размером от нескольких мм до нескольких см (Верещагина и др., 1986), так и микрофауну, куда входят коллемболы, мезостигматические и панцирные клещи и другие группы почвенных микроартропод (Мелехина, 2001).

Целью данной работы было изучение влияния газопровода на почвенных беспозвоночных после его введения в эксплуатацию.

В задачу исследований входили:

- 1) выявление изменений в структуре населения почвенной фауны и видовом разнообразии основных таксономических групп;
- 2) определение численности педобионтов в естественных условиях и на участке газопровода при изменении температурного режима и сложения почв.

Материал и методика исследования

Исследования проводились в третьей декаде июня 2004 г. на линии газопровода СРТО — Торжок (Ухтинский район, Республика Коми). Были выбраны 3 участка: 1-й — на линии действующего газопровода; 2-й — на линии подземного кабеля, проходящего рядом с газопроводом; 3-й — в ельнике бруснично-зеленомошном, находящемся по соседству. Второй участок служил в качестве контрольного первому участку (газо-

проводу). Третий участок (ельник бруснично-зеленомошный) рассматривался в качестве исходного биотопа, характеризующего существовавший биоценоз до строительства газопровода и прокладки кабеля.

При изучении почвенной мезофауны использовали прямой метод учета — отбор почвенных проб с использованием случайной выборки с последующей ручной разборкой (Гиляров, 1975; Количественные методы ..., 1987). Ручная разборка почвенных проб дает наиболее объективные данные о численности и встречаемости отдельных таксонов и экологических групп. Именно данные, полученные при ручной разборке, оказываются наиболее сопоставимыми при сравнительных зональных, региональных и биоценологических исследованиях (Верещагина и др., 1986).

На каждом участке брали по 10 почвенно-подстилочных проб размером 25x25 см до глубины встречаемости животных. Пробы разбирали вручную в стационарных условиях. Всех собранных животных, за исключением дождевых червей, фиксировали в 70-процентном этиловом спирте и этикетировали. Дождевых червей вместе с почвой собирали в отдельные мешочки, а затем в лабораторных условиях отмытых чистой водой червей умерщвляли 2-процентным формалином и расправляли. Через 10-15 минут затвердевших червей помещали в высокие пробирки и заливали 4-5-процентным формалином. Определение собранного материала осуществляли под бинокулярном МБС-10, используя определитель И.И. Малевича (1950).

Для получения качественных и количественных характеристик микроартропод с каждого участка дополнительно брали еще по 10 почвенно-подстилочных проб, но меньшего объема (10x10x10 см). Каждый кубик почвы с этикеткой помещали в матерчатый мешочек. Выгонку животных из почвенных образцов проводили на термоэлектрорах Берлезе-Тулльгрена, различные модификации которых приведены в литературе (Гиляров, 1975; Количественные методы..., 1987). В аппарате проба помещалась на проволочное сито размером ячейки 1-2 мм, через которые могут проходить только мелкие членистоногие. Сито находится в воронке, которая ведет в сосуд с фиксирующей жидкостью, состоящей из 75-процентного раствора спирта с добавлением глицерина и этилового эфира. Выгонка продолжалась в течение 7 дней. Разборка проб велась под бинокулярном МБС-10. Из всех извлеченных микроартропод изготавливались микропрепараты с использованием жидкости Фора-Берлезе (Буланова-Захваткина, 1967), состоящей из 200 весовых частей хлоралгидрата, 30 — гумиарабика, 20 — глицерина и 50 — дистиллированной воды. Препараты сушились в течение 1-2 недель при комнатной температуре. Определение микроартропод осуществляли под микроскопом Р-17 и Биолам-И. Вычисляли среднюю плотность или численность животных (экз/м²) и индекс доминирования (Песенко, 1982). К доминирующим относили те виды, относительное обилие кото-

рых составляло более 10% от числа всех особей, к субдоминантам — от 2,5 до 9,9%.

Результаты и их обсуждение

Исследования показали, что в составе почвенной мезофауны в зоне газопровода 50 % составляют дождевые черви (*Lumbricidae*), 42,1 % — жуки (*Coleoptera*) и 7,9 % — многоножки (*Myriapoda*), тогда как на контрольном участке на долю дождевых червей приходится лишь 8,6 %, в 2 раза больше жуков, присутствуют представители двукрылых насекомых и многоножек (рис. 1). В ельнике бруснично-зеленомошном дождевые черви вообще отсутствуют, высока доля многоножек.

В зоне газопровода численность жуков в 4 раза меньше по сравнению с контрольным участком (25,6 и 107,2 экз/м² соответственно), а численность коротконадкрылых жуков и долгоносиков примерно в 10 и 25 раз меньше (табл. 1).

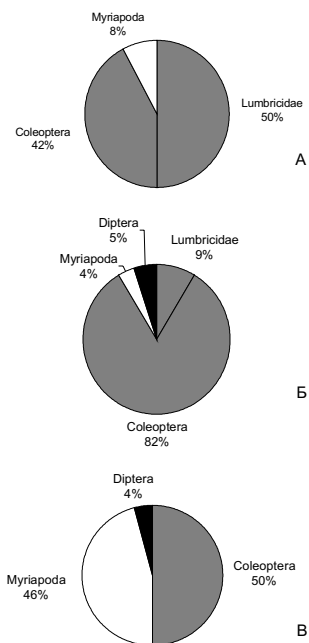


Рис. 1. Соотношение основных таксономических групп почвенной мезофауны: А — газопровод; Б — контроль; Е — ельник

Таблица 1

Таксономическая структура и численность почвенной мезофауны

Систематическая группа	Численность, экз/м ²		
	Газопровод	Контроль	Ельник
Lumbricidae	30.4	11.2	-
Coleoptera	25.6	107.2	19.2
в т.ч. Carabidae	9.6	17.6	3.2
Staphylinidae	6.4	56.0	6.4
Elateridae	4.8	8.0	-
Curculionidae	1.6	25.6	3.2
Прочие жуки	3.2	-	6.4
Diptera	-	6.4	1.6
Myriapoda	4.8	4.8	17.6
Итого:	60,8	128,6	38,4

Анализ видового разнообразия (табл. 2) основных таксономических групп почвенной мезофауны (жуков и дождевых червей) подтвердил резкое снижение числа видов в зоне газопровода (10) по сравнению с контрольным участком (25 видов).

Таким образом, можно констатировать, что существовавший до строительства газопровода ельник бруснично-зеленомошный, характеризующийся высокой влажностью, хорошо развитым моховым покровом и слабым присутствием травянистой растительности, имел бедный состав и низкую численность почвенной мезофауны, представленной в основном многоножками, небольшим числом видов жуков и двукрылых. В результате вырубki леса при строительстве газопровода появилось огромное открытое пространство, зарастающее травянистой растительностью (поскольку древесная растительность искусственно уничтожается), разбивается дерновый слой почвы, изменяется микроклимат.

Таблица 2

Видовой состав и численность (экз/м²) дождевых червей и жесткокрылых

Виды	Биотопы		
	Газопровод	Контроль	Ельник
1	2	3	4
Lumbricidae			
Eisenia foetida Sav	8.0	1.6	
Dendrobaena octaedra Sav	20.8	8.0	
Lumbricus rubellus Hoffm.	1.6	1.6	
Elateridae			
Selatosomus aeneus L.	4.8	6.4	
Athous sp.		1.6	

Виды	Биотопы		
	Газопровод	Контроль	Ельник
1	2	3	4
Carabidae			
Bembidion sp.	3.2		
Clivina fossor L.		3.2	
Amara lunicollis Schiodte		1.6	
A. aenea Deg.		1.6	
A. brunea Gyll.		3.2	
A. littorea Thoms.		3.2	
Calathus micropterus Duf.			3.2
Poecilus cupreus L.	4.8		
Pterostichus sp.		3.2	
Staphylinidae			
Aleochara sp.	1.6		
Atheta sp.		9.6	
Gabrius sp.	1.6	4.8	
Dinarda dentata Grav.		1.6	
Bledius erraticus Er.		1.6	
Conosoma littoreus L.		3.2	3.2
Tachinus proximus Kr.	1.6	1.6	
T. pallipes Grav.		1.6	
T. humeralis Grav.		1.6	
Tachyporus sp.		11.2	3.2
T. chrysomelinus L.		3.2	
Lathrobium brunnipes Fabr.		6.4	
L. boreale Hoch.		3.2	
Stenus tarsalis Ljugh.		1.6	
Xantholinus tricolor Fabr.	1.6		
Quedius fuliginosus Grav.		1.6	
Всего видов:	10	25	3

Появляются дождевые черви, различные виды жуков и двукрылых, свойственные для луговых сообществ, численность которых постепенно увеличивается. Одновременно уменьшается численность многоножек. С пуском газопровода появляется дополнительный температурный фактор. Почва в зоне действия газопровода становится более сухой, поэтому изменяется структура населения почвенной мезофауны, исчезают многие мезофильные виды насекомых, уменьшается их численность.

Влияние газопровода сказывается также на видовом разнообразии и численности почвенной микрофауны. Общая численность всех трех основных групп мелких беспозвоночных: ногохвосток, орибатид и мезостигматических клещей, в зоне газопровода существенно ниже (по

первым двум группам примерно в 2 раза) по сравнению с контрольным участком (рис. 2) и во много раз меньше, чем в ельнике.

Более подробно нами проанализировано изменение структуры населения и численность ногохвосток. В целом, ногохвостки — холодолюбивая и холодовыносливая группа членистоногих. Они дальше всех идут на Север и выше всех поднимаются в горы. С продвижением к более высоким широтам как в лесных, так и открытых ландшафтах их общая численность увеличивается. Температурный порог развития у многих видов близок к 0°C, но имеются более теплолюбивые формы. Повышение температуры укорачивает межличиный период, но при этом увеличивается смертность. У некоторых видов скорость развития возрастает вплоть до летальных температур, у других перед верхней летальной точкой она замедляется.

В почвенных пробах нами зарегистрировано всего 26 видов ногохвосток, относящихся к 17 родам и 10 семействам (табл. 3). В ельнике обнаружено 19 видов, на газопроводе — 12 и контрольном участке — 13. Общими для всех 3-х участков являются 6 видов: *Isotoma viridis*, *Desoria hiemalis*, *Parisotoma notabilis*, *Isotomilla minor*, *Folsomia quadrioculata*, *Entomobrya nivalis*. Эти же виды являются массовыми. 3 вида зарегистрированы только в зоне газопровода, 3 — только на контрольном участке и 8 — только в ельнике.

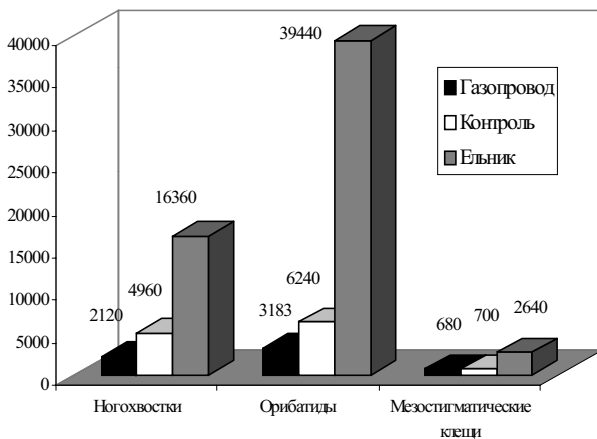


Рис. 2. Общая численность (экз/м²) основных групп почвенной микрофауны

Структура населения ногохвосток

Виды	Биотопы		
	Газо-провод	Контроль-ный уча-сток	Ельник
Hypogastruridae			
1. Xenylla brevicauda (Tullberg, 1869)		+	
2. Ceratophysella sp.	+		+
Onychiuridae			
3. Supraphorura furcifera (Börner, 1901)		+	+
4. Protaphorura boedvarssoni Pomorski, 1993	+		+
5. Mesaphorura macrochaeta Rusek, 1976			+
Neanuridae			
6. Pseudachorutes dubius Krausbauer, 1898			+
7. Neanura muscorum (Templeton, 1835)	+		
8. Neanura reticulata (Axelson, 1905)			+
Isotomidae			
9. Isotoma viridis Bourlet, 1839	+	+	+
10. Desoria hiemalis (Schött, 1893)	+	+	+
11. Parisotoma notabilis (Schäffer, 1896)	+	+	+
12. Proisotoma sp.		+	+
13. Isotomiella minor (Schäffer, 1896)	+	+	+
14. Anurophorus palaearticus Potapov, Stebaeva, 1990		+	+
15. Anurophorus laricis Nicolet, 1842		+	
16. Folsomia quadrioculata (Tullberg, 1871)	+	+	+
17. F. manolachei Bagnall, 1939 sensu eharveng, 1982	+	+	
Entomobryidae			
18. Entomobrya nivalis (L., 1758)	+	+	+
19. E. marginata (Tullberg, 1871)			+
20. Orchesella flavescens (Bourlet, 1839)	+		
21. Lepidocyrtus lignorum (Fabricius, 1775)	+		
22. Lepidocyrtus cyaneus (Tullberg, 1871)			+
Sminthuridae			
23. Sphaeridia pumilis Krausbauer, 1898		+	
Arrhopalitidae			
24. Arrhopalites principalis Stach, 1945			+
Katiannidae			
25. Sminthurinus concolor (Meinert, 1896) Stach, 1956			+
Sminthuridae			
26. Sminthurus sp.			+
Всего видов:	12	13	19

В зоне газопровода доминировали *Parisotoma notabilis* (35,8 %) и *Desoria hiemalis* (24,5 %), на контрольном участке — *Parisotoma notabilis* (59,7 %) и *Isotomiella minor* (19,3 %), в ельнике — *Folsomia quadrioculata* (41,3 %) и *Desoria hiemalis* (21,3 %). Разные виды коллембол относятся к разным экологическим группам, и их требования к температуре различны. Обитатели почвы способны больше к области низких температур, тогда как обитатели подстилки выдерживают более широкий диапазон температур. Поэтому в зоне воздействия газопровода по обилию преобладают верхнеподстилочные формы ногохвосток, а на контрольном участке и в ельнике — полупочвенные (рис. 3).

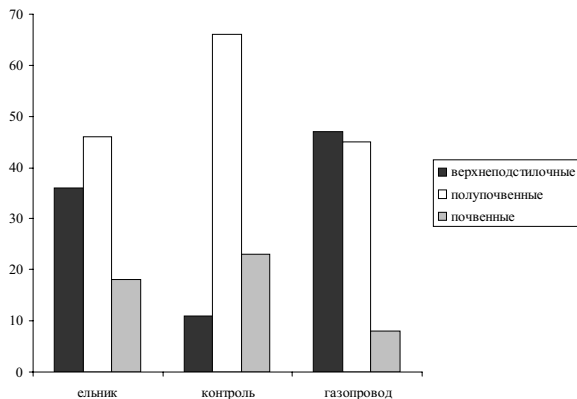


Рис. 3. Соотношение экологических групп ногохвосток по обилию (%)

На основе проведенных исследований населения педобионтов в зоне действующего газопровода можно сделать предварительный вывод о том, что изменение почвенного покрова, растительности и температурного режима влияет на почвенную мезо- и микрофауну. Это воздействие выражается прежде всего в изменении структуры населения почвообитающих беспозвоночных животных, уменьшении их видового разнообразия и численности. Поэтому педобионтов можно использовать в качестве биоиндикаторов состояния окружающей среды. В дальнейшем на основе более детальных исследований в течение всего вегетационного периода на протяжении нескольких лет можно определить отдельные индикаторные виды, наиболее подходящие для мониторинга.

* * *

1. Буланова-Захваткина Е.М. Панцирные клещи. М.: Высшая школа, 1967. 156 с.
2. Верещагина Т.Н., Куперман Р.Г., Степанов А.М. Почвенные жесткокрылые (мезофауна) как возможные индикаторы промышленного загрязнения окружающей среды // Пограничные проблемы экологии: Сб. науч. трудов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. С. 30-40.
3. Гиляров М.С. Учет мелких членистоногих (микрофауна) и нематод // Методы почвенно-зоологических исследований. М., 1975. С. 30-43.
4. Количественные методы в почвенной зоологии // Ю.Б.Бызова, М.С.Гиляров, В.Дунгер и др. М., 1987. 288 с.
5. Криволицкий Д.А. Морфологические типы панцирных клещей // Зоол. журн. 1965. Т.44. Вып. 8. С. 40.
6. Криволицкий Д.А. Почвенная фауна в экологическом контроле. М.: Наука, 1994. 269 с.
7. Малевич И.И. Собрание и изучение дождевых червей-почвообразователей. М.; Л., 1950. 37 с.
8. Мелехина Е.Н. Экологические группы панцирных клещей и возможность использования их в биологическом мониторинге // Современные проблемы биоиндикации и биомониторинга: Тез. докл. междунар. симп. по биоиндикаторам. Сыктывкар, 2001. С. 129-130.
9. Песенко Ю.А. Принципы и методы количественного анализа и фаунистических исследований. М.: Наука, 1982. 135 с.

Г.Н. Доровских, В.Г. Степанов
Сыктывкарский госуниверситет
Печоро-Илычский заповедник

Возраст хозяина и структура компонентных сообществ паразитов у гольяна обыкновенного *PHOXINUS PHOXINUS* (L.)

Исследован видовой состав и структура сообществ паразитов гольяна обыкновенного разного возраста из двух участков р. Печоры в пределах Печоро-Илычского заповедника. Показано, что компонентные сообщества паразитов гольяна в течение года проходят состояния формирования, сформированности и разрушения.

Итог работам 1920-х — 1990-х гг. по изучению паразитарных сообществ подвел О.Н. Пугачев (1999; 2000 и др.), он же заложил методические основы их дальнейшего изучения. К настоящему времени выяснили (Доровских, 1999а; 1999б; 2000а; 2000б; 2000в; 2002а; 2002б; 2003а; 2003б; 2003в; Доровских, Макарова, 2003; Макарова, 2003; Голикова, Макарова, Степанов, 2003; и др.), что для компонентных сообществ паразитов половозрелых рыб из экологически благополучных водоемов в период, когда сообщество содержит максимальное число видов, характерно наличие трех групп видов, каждая из которых занимает интервал, равный 15-кратной разнице между максимально и минимально возможными величинами биомасс видов, составляющих эту группу сообщества; критической величиной суммы ошибок уравнений регрессии, описывающих разброс значений биомасс видов в таком сообществе, следует считать 0.250; большая величина ошибки свидетельствует о значительной разбалансировке отношений биомасс видов в сообществе. Всегда ли компонентные сообщества паразитов у рыб при названных условиях соответствуют приведенному описанию и отличается ли от этого описания структура сообщества паразитов у молоди хозяина? Известно (Пугачев, 1999), что компонентные сообщества паразитов молоди рыб характеризуются как несбалансированные. В то же время показано (Доровских, 2002а) наличие состояний формирования, сформированности и разрушения у сообществ паразитов от молоди и половозрелых особей гольяна речного, которые они проходят в течение года. Следовательно, сообщества паразитов у молоди рыб могут быть как сбалансированными, так и несбалансированными.

Цель работы — на примере компонентных сообществ паразитов гольяна обыкновенного выяснить, насколько стабильны названные характеристики компонентных сообществ паразитов, и выявить особенности структуры сообществ паразитов у молоди рыб.

Под сообществом будем понимать «...совокупность совместно обитающих организмов разных видов, представляющую собой экологическое единство...» (Биологический..., 1986: 595).

В этой работе, помимо использования общепринятого описания компонентных сообществ (Пугачев, 1999; 2000; и др.), учли одноклеточных паразитов не только по числу особей паразитов, но и по данным об их условной биомассе, использовали графический способ отражения структуры сообщества и количественную оценку ее состояния (Доровских, 1996; 2001; 2002а; 2002б; и др.).

Условная биомасса — приведенный линейный размер вида, умноженный на число найденных его особей. Приведенный линейный размер вида — среднее геометрическое из максимальных значений длины, ширины и высоты тела паразита данного вида. Полученную величину можно использовать как характеристику вида в составе рассматриваемого компонентного сообщества, характеризуемого имеющейся выборкой.

В след за Пугачевым (1999) в работе использованы понятия: «компонентное сообщество» — группа видов паразитов, населяющая популяцию хозяина; «автогенные виды» — виды, заканчивающие жизненный цикл в пределах гидробиоценоза; «аллогенные виды» — используют рыб и беспозвоночных как промежуточных хозяев, завершая развитие в птицах и млекопитающих, либо в позвоночных, в основном связанных с сушей; «виды-специалисты» — виды, встречающиеся только у рыб одного вида, рода или даже семейства; «виды-генералисты» — обычно приурочены к нескольким родам или семействам рыб.

Материал и методика

Сбор материала произведен в 2000, 2001 и 2003 г. из русла верхнего течения р. Печоры (территория Печоро-Илычского государственного природного заповедника, Троицко-Печорский р-н, Республика Коми) в районе п. Якша (исследовано 65 экз. гольяна речного) и устья р. Гаревки (45 экз.). Координаты п. Якша — 56° 502 463 в.д., 61° 492 053 с.ш., координаты стационара в устье р. Гаревки — 58° 282 053 в.д., 62° 032 413 с.ш. В районе р. Гаревки гольян отловлен 15 августа 2003 г. в течение часа из одного участка длиной около 3 м. Всего отловили 110 экз. гольяна возрастом от 0+ до 3+. Рыбу сразу фиксировали в 10-процентном растворе формалина. Гольяна разного возраста помещали в разные емкости. Затем рыбу вскрывали по общепринятой методике (Быховская-Павловская, 1985) с учетом поправок для работы с фиксированной рыбой. На наличие паразитов просматривали и осадок, образовавшийся в материальных банках, в которых держали рыбу до вскрытия.

Для описания сообществ использованы (S — количество видов; N — число особей всех видов, для миксоспоридий — цист; n_i — число особей i -го вида; B — биомасса или условная биомасса всех видов; b_i — биомасса или условная биомасса i -го вида; p_{i1} — относительное обилие i -го вида равно n_i/N и p_{i2} — относительное обилие i -го вида равно b_i/B):

- 1) индекс разнообразия компонентных сообществ Шеннона:

$$H_p = - \sum p_{i1} \ln p_{i1}, H_b = - \sum p_{i2} \ln p_{i2};$$

- 2) индекс выравненности видов в сообществе по обилию

$$E_p = H_p / \ln S, E_b = H_b / \ln S;$$

- 3) индекс доминирования Бергера-Паркера

$$d_p = N_{\max} / N_T, d_b = B_{\max} / B_T,$$

где N_T — общее количество особей паразитов всех видов в сообществе, N_{\max} — число особей доминантного вида, для микроспоридий — цист, B_T — общая биомасса или условная биомасса всех особей паразитов всех видов в сообществе, B_{\max} — биомасса или условная биомасса всех особей доминантного вида.

При построении графиков применены натуральные логарифмы. Нумерация видов в сообществах произведена от вида с максимальным значением биомассы к виду с ее минимальным значением.

Результаты исследования

У гольяна из русла р. Печоры в районе п. Якша отметили 20 видов паразитов (табл. 1). У рыбы возраста 0+ нашли 4 их вида, у особей хозяина возраста 2+-3+ — 12-19 видов.

У рыбы из русла р. Печоры в районе устья р. Гаревки нашли 16 видов паразитов (табл. 2). У гольяна возраста 0+ отметили 3 их вида, у рыб возраста 1+ — 7 видов, у хозяев возраста 3+ — 15 видов паразитов.

У гольяна из района п. Якша, где река приобретает равнинный характер, в паразитофауне присутствуют *Trichodina sp.*, *Gyrodactylus macronychus*, *G. magnificus*, *Schistocephalus nemachili*, *Allocreadium isoporum*, *Rhipidocotyle campanula*, *Unionidae gen. sp.* Наличие этих видов паразитов, видимо, связано со снижением скорости течения воды в реке, появлением песчаных и заиленных участков дна в ее русле, водной растительности, с возрастанием числа и разнообразия пойменных водоемов. Это способствует увеличению видового разнообразия и численности водных беспозвоночных — промежуточных хозяев паразитов, закреплению *Unionidae*, ведущих роющий образ жизни. Особенно велика в этом районе зараженность гольяна метацеркариями *Rhipidocotyle campanula*, промежуточные хозяева которых, двустворчатые моллюски, предпочитают заиленные пески (Лешко, 1983). Здесь же держатся водоплавающие и околоводные птицы — окончательные хозяева для видов *Schistocephalus*, *Diplostomum* и др.

У гольяна из района впадения р. Гаревки, где р. Печора носит предгорный характер, нашли *Muxobolus bramae* и *Philometra abdominalis*. Эти виды, наверняка, будут найдены и у гольяна из равнинных участков реки.

В сообществе паразитов у гольяна из района п. Якша во всех случаях отмечено по три группы паразитов (рис. 1; табл. 3). Суммы ошибок уравнений регрессии, описывающих разброс значений условных биомасс видов в составе сообщества, невелики (табл. 4) и не превышают критического значения 0.250 (Доровских, 2001; 2002в). В сообществе по численности и биомассе доминирует *Rhipidocotyle campanula*, только в сообществе паразитов у гольяна 0+ по численности преобладает *Diplostomum phoxini*. В сообществе лидируют автогенные виды и виды-генералисты (табл. 5). Индексы, подсчитанные по данным о численности и биомассе паразитов, близки по своим значениям. В начале июня значения индексов доминирования Бергера-Паркера низкие, индексов Шеннона и выравниваемости видов — высокие. В конце июня, наоборот, индексы доминирования Бергера-Паркера высокие, индексы Шеннона и выравниваемости видов — низкие. В середине августа сообщество паразитов у рыб 0+ имеют средние значения индекса Бергера-Паркера, высокие — индекса выравниваемости видов, низкие индекса Шеннона.

В сообществе паразитов у гольяна 1+ из района устья р. Гаревки виды по значениям своих условных биомасс поделились на три группы, в сообществе паразитов у гольяна 3+ — на четыре, в сообществе паразитов у хозяев 0+ — на две группы (рис. 2; табл. 6). Суммы ошибок уравнений регрессии ниже критического значения (табл. 7). В сообществе по численности и биомассе лидирует *Diplostomum phoxini*, преобладают аллогенные виды и виды-специалисты (табл. 8). Индексы, подсчитанные по данным о численности и биомассе паразитов, близки по своим значениям. Индексы доминирования Бергера-Паркера высокие, индексы Шеннона и выравниваемости видов — низкие.

Итак, характеристики сообществ паразитов у рыб разных возрастов в условиях района устья р. Гаревки очень близки, различны только показатели числа видов, особей и биомассы паразитов у хозяев разного возраста, что подтверждает известное правило Догеля (1958) о качественном и количественном нарастании зараженности паразитами хозяина с возрастом.

Характеристики сообществ паразитов у гольяна из района п. Якша близки между собой только в начале июня 2003 г. Сообщества паразитов в конце июня 2000 г. и середины августа 2001 г. не похожи ни на одно из сообществ перечисленных выше, что требует своего объяснения.

Обсуждение результатов

Известно, что структура компонентных сообществ ихтиопаразитов в значительной мере определяется возрастом паразитов. В связи с этим предложено различать сообщества в состояниях формирования, сформированности и разрушения (Доровских, 2002а; 2002г).

Сформированное сообщество характеризуется небольшими величинами индекса доминирования, высокими — индексов Шеннона и выравненности видов. Индексы, полученные по данным о числе особей и биомассе видов, близки по своим значениям. Число видов максимально для водоемов. Оно отличается наличием в структуре, выделенной по соотношению условных биомасс составляющих его видов, трех групп паразитов. Точки условных биомасс видов в экологически благополучных водоемах точно ложатся на отрезки прямых линий. Виды в основном представлены зрелыми особями и личиночными стадиями паразитов, использующих рыбу как промежуточного хозяина.

Сообществу в состоянии формирования присущи малое видовое разнообразие, низкие значения индекса Шеннона, часто высокие — индекса доминирования; наличие двух-трех групп паразитов в структуре, описываемой вариационными кривыми условных биомасс видов; отклонение точек условных биомасс видов от прямой регрессии; суммы ошибок уравнений регрессии ниже порогового значения; сообщество состоит из молодых особей и личиночных стадий паразитов.

Формирующееся сообщество по значениям индексов похоже на сообщество в состоянии разрушения.

Сообщество паразитов у гольяна в состоянии разрушения отличается низкими значениями индекса доминирования и относительно небольшим видовым разнообразием. Это сообщество образовано одной-двумя группами видов, ошибки уравнений регрессии, описывающих разброс точек условных биомасс паразитов, высоки. Паразиты представлены зрелыми, яйцекладущими и отмирающими особями; имеются личиночные стадии паразитов, использующих рыб в качестве промежуточных хозяев.

В начале июня в условиях верхнего течения р. Печоры паразиты зрелые, яйцекладущие, личиночные стадии паразитов, использующих гольяна в качестве промежуточного хозяина, достигают максимальных размеров. И это оправдано, т.к. пролет и прилет водоплавающих и околоводных птиц в этих районах происходит в мае (Бешкарев, 2000). В эти же сроки, обычно 5-15 мая, вскрывается река (Атлас..., 1997). Таким образом, паразиты, имеющие в качестве окончательного хозяина названных птиц, получают возможность попасть в следующего хозяина. Характеристики сообщества паразитов в начале июня совпадают с таковыми для сформированных сообществ.

В начале июля гольян идет на нерест (Королев, 2000). В 2000 г. это произошло в последней декаде июня. И именно в конце июня часть паразитов заканчивают яйцекладку или отрождение молоди, как, например, *Philometra abdominalis* (Определитель..., 1987). Это сразу же отражается на характеристиках сообщества. Значения индексов доминирования возрастают, а индексов выравненности видов и Шеннона снижаются, в сообществе увеличивается доля видов-генералистов, т.е.

получается картина, противоположная августу, когда гольян находится в посленерестовом состоянии. Эти данные совпадают с данными Пугачева (1999) для сообществ паразитов озерного гольяна. Видимо, в конце июня начинается процесс разрушения сообщества.

В августе наряду с особями паразитов прошлой генерации появляются особи паразитов новой генерации. В это время значительно возрастает интенсивность инвазии *Diplostomum phoxini* рыбы (табл. 2). По своим характеристикам сообщества паразитов у гольяна из района устья р. Гаревки соответствуют сообществу в состоянии формирования (табл. 8). При этом характеристики сообществ паразитов у гольяна разного возраста совпадают, различаются только показатели числа видов, особей и биомассы паразитов. Число групп видов в сообществе в этот период колеблется от двух до четырех. Сообщество паразитов у рыб 0+ из района п. Якша отличается от сделанных описаний и не подпадает под классификацию Пугачева (1999), делящего сообщества на сбалансированные и несбалансированные. Однако по числу видов, показателям зараженности *D. phoxini* рыб, «графической» структуре оно похоже на сообщество паразитов у гольяна 0+ из района устья р. Гаревки. Отсюда можно предположить, что сообщество паразитов у гольяна 0+ из района п. Якша, вероятно, находится в состоянии формирования, на это указывает и наличие в сообществе двух видов-доминантов.

Таким образом, в августе сообщества паразитов, судя по имеющимся данным, находятся в стадии становления и отличаются неустойчивостью. Это не случайно, т.к. в конце августа-сентябре через эти места осуществляется пролет околородных и водоплавающих птиц (Бешкарев, 2000) и паразиты вновь получают шанс попасть в окончательного хозяина.

Итак, сообщество паразитов гольяна в начале июня сформировано, в конце июня, видимо, находится в начале фазы разрушения, в середине августа сообщество формируется.

Ранее (Доровских, 2002д) сделано описание 6 компонентных сообществ паразитов у половозрелого гольяна речного из оз. Кривое на о. Колгуев, водоемов Печорского и Мезенского бассейнов. Для них характерны следующие общие черты: в сообществе лидируют аллогенные виды и виды-специалисты; доминирует аллогенный специалист *D. phoxini*; в компонентном сообществе паразитов у гольяна отмечено по три группы видов; сумма ошибок уравнений регрессии не превышает 0.250. Эти признаки присущи и сообществам паразитов у гольяна из района устья р. Гаревки (табл. 8; рис. 2).

В двух экологически благополучных участках р. Колвы в компонентных сообществах паразитов у половозрелого гольяна лидируют автогенные виды и виды-специалисты; доминирует автогенный специалист *Thelohanellus oculileucisci*; по значениям условных биомасс виды раз-

биты на три группы; суммы ошибок уравнений регрессии менее 0.250 (Доровских, 2000б; 2000в).

В сообществах паразитов у гольяна 2+ — 3+ из района п. Якша в июне отмечено по три группы паразитов (рис. 1); суммы ошибок уравнений регрессии, описывающих разброс значений условных биомасс видов в составе сообщества, не превышают 0.250; по численности и биомассе доминирует *Rhipidocotyle campanula*; лидируют автогенные виды и виды-генералисты (табл. 5).

Таким образом, доминирующие виды и группы видов в сообществах паразитов могут меняться, как и значения индексов, их описывающих. Этот вывод согласуется с результатами исследований Пугачева (2000) компонентных сообществ паразитов у гольяна из водоемов Евразии. В то же время число групп паразитов, выделенных по соотношению условных биомасс, остается постоянным, как и значения сумм ошибок уравнений регрессии, характеризующих сообщества, всегда ниже 0.250.

Компонентные сообщества паразитов у молоди рыб отличаются от сообществ паразитов у половозрелых рыб меньшим видовым богатством, меньшей биомассой и количеством особей паразитов. Сообщества паразитов у рыб 0+ характеризуются порой меньшим числом групп паразитов, выделенных по соотношению их биомасс, наличием двух видов-доминантов, невозможностью подсчитать сумму ошибок уравнений регрессии, описывающих разброс значений биомасс их составляющих видов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 04-04-96030), Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Коми, Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми.

* * *

1. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии. М.: Дрофа; ДиК, 1997. 116 с.
2. Бешкарев А.Б. Водоплавающие и околоводные птицы // Земля девственных лесов (Печоро-Илычский биосферный заповедник). Сыктывкар, 2000. С. 80-87.
3. Биологический энциклопедический словарь / Гл. ред. М.С. Гиляров; Редкол.: А.А. Баев, Г.Г. Винберг, Г.А. Заварзин и др. М.: Сов. энциклопедия, 1986. 831 с.
4. Быховская-Павловская И.Е. Паразиты рыб: Руководство по изучению. Л.: Наука, 1985. 122 с.
5. Голикова Е.А., Макарова Л.Р., Степанов В.Г. Структура зрелых компонентных сообществ паразитов рыб // Проблемы современной паразитологии: Междунар. конф. и III съезд Паразитол. об-ва при РАН. Петрозаводск, 2003. С. 126-127.

6. Догель В.А. Паразитофауна и окружающая среда: Некоторые вопросы экологии паразитов пресноводных рыб // Основные проблемы паразитологии рыб. Л.: Изд-во ЛГУ, 1958. С. 9-54.
7. Доровских Г.Н. Структура паразитофауны *Rhoxinus phoxinus* (L.) с позиций концепции А.В. Жирмунского и В.И. Кузьмина // Паразитологические проблемы больших городов. СПб., 1996. С. 31.
8. Доровских Г.Н. Структура сообществ ихтиопаразитов в водоемах с разной степенью загрязнения // Матер. междунар. совещ. «Жизнь и факторы биогенеза». Ижевск, 1999а. С. 56-58.
9. Доровских Г.Н. Структура сообществ паразитов как показатель состояния среды // Междунар. конф. «Биоразнообразие наземных и почвенных беспозвоночных на Севере». Сыктывкар, 1999б. С. 69-70.
10. Доровских Г.Н. Мониторинг гидробиоценозов по данным ихтиопаразитологических наблюдений // Науч.-практ. конф. «Состояние и динамика природных комплексов особо охраняемых территорий Урала». Сыктывкар, 2000а. С. 47-49.
11. Доровских Г.Н. Мониторинг гидробиоценозов водоемов нефтегазоносных районов по данным ихтиопаразитологических наблюдений // Науч.-практ. конф. «Геоэкологические аспекты функционирования хозяйственного комплекса Западной Сибири». Тюмень, 2000б. С. 30-33.
12. Доровских Г.Н. Мониторинг гидробиоценозов по ихтиопаразитологическим исследованиям в бассейне реки Колва // Матер. научн.-практ. конф. «Экологические работы на месторождениях нефти Тимано-Печорской провинции. Состояние и перспективы». Сыктывкар, 2000в. С. 55-61.
13. Доровских Г.Н. Теоретические и методические подходы к изучению компонентных сообществ паразитов пресноводных рыб // Биоразнообразие Европейского Севера: Тез. докл. междунар. конф. Петрозаводск, 2001. С.57-58.
14. Доровских Г.Н. Паразиты пресноводных рыб северо-востока Европейской части России (фауна, экология паразитарных сообществ, зоогеография): Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 2002а. 50 с.
15. Доровских Г.Н. Паразитарные сообщества нарушенных гидробиоценозов // Тр. Междунар. форума по проблемам науки, техники и образования / Под ред. В.П. Савиных, В.В. Вишневого. М.: Академия наук о Земле, 2002б. Т. 3. С. 34-35.
16. Доровских Г.Н. Методика мониторинга гидробиоценозов по структуре и видовому богатству сообществ паразитов рыб // Экологический мониторинг: Учеб.-метод. пособие. Сыктывкар, 2002в. С. 50-105.
17. Доровских Г.Н. Сезонные состояния компонентных сообществ паразитов пресноводных рыб // Матер. III регион. межвуз. науч.-технич. конф. «Вузовская наука — региону». Вологда, 2002. С. 174-176.
18. Доровских Г.Н. Компонентные сообщества паразитов гольяна речного в бассейнах рек Печора, Мезень и в оз. Кривое на о. Колгуев // Водные организмы в естественных и трансформированных экосистемах Европейского Северо-Востока. Сыктывкар, 2002д. С. 151-162. (Тр. Коми НЦ УрО РАН, № 170).
19. Доровских Г.Н. Компонентные сообщества паразитов *Carassius carassius* из водоемов северо-востока Европейской части России // Междунар. конф. «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера». Сыктывкар, 2003а. С. 31.

20. Доровских Г.Н. Организация компонентных сообществ паразитов пресноводных рыб // II Междун. конф. «Разнообразие беспозвоночных животных на Севере». Сыктывкар, 2003б. С. 23-24.
21. Доровских Г.Н. Компонентные сообщества паразитов рыб в экологически благополучных и загрязненных водоемах // Проблемы современной паразитологии: Междунар. конф. и III съезд Паразитол. об-ва при РАН. СПб., 2003в. С. 143-144.
22. Доровских Г.Н., Макарова Л.Р. Компонентные сообщества паразитов золотого карася *Carassius carassius* (L.) из водоемов северо-востока Европейской части России // Паразиты рыб: современные аспекты изучения: Конференция, посвященная памяти доктора биологических наук, профессора Б.И. Купермана (1933-2002). Борок, 2003. С. 19-20.
23. Королев В.В. Рыбы // Земля девственных лесов (Печоро-Илычский биосферный заповедник). Сыктывкар, 2000. С. 95-100.
24. Лешко Ю.В. Пресноводные моллюски бассейна Печоры: Состав, распространение, экология, значение в питании рыб. Л.: Наука, 1983. 128 с.
25. Макарова Л.Р. Компонентные сообщества паразитов золотого карася (*Carassius carassius* (L.) из водоемов реки Локчим // II Междун. конф. «Разнообразие беспозвоночных животных на Севере». Сыктывкар, 2003. С. 49.
26. Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР. Л.: Наука, 1987. Т. 3. 583 с.
27. Пугачев О.Н. Паразиты пресноводных рыб Северной Азии (фауна, экология паразитарных сообществ, зоогеография): Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 1999. 50 с.
28. Пугачев О.Н. Паразитарные сообщества речного голяна (*Phoxinus phoxinus* L.) // Паразитология. 2000. Т. 34. Вып. 3. С. 196-209.

Приложение

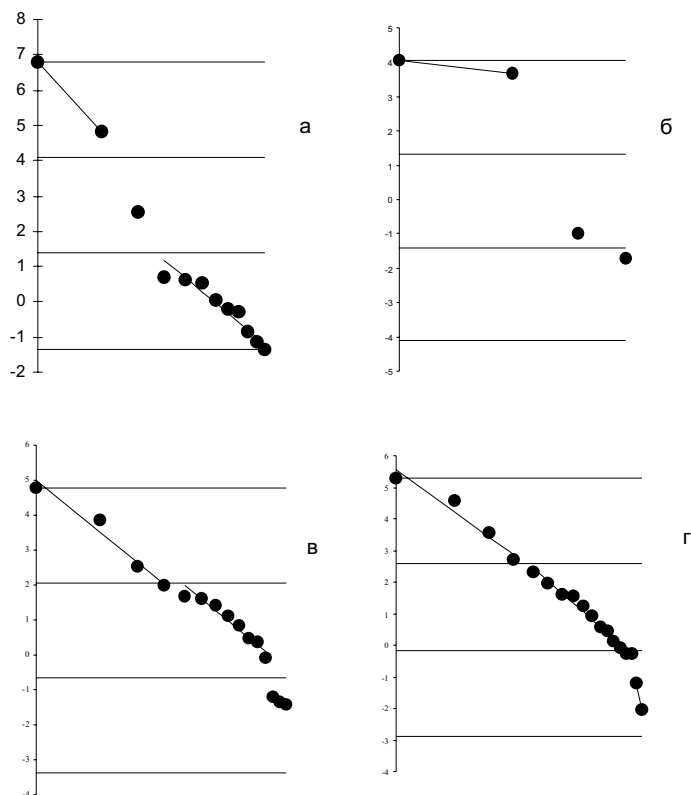


Рис. 1. Вариационные кривые условных биомасс паразитов гольяна обыкновенного разного возраста из русла р. Печоры у п. Якша (Центральная усадьба Печоро-Илычского биосферного заповедника):
 а — рыба отловлена 30.06.2000 г., возраст рыбы 2+ — 3+;
 б — рыба отловлена 16.08.2001 г., возраст рыбы 0+;
 в — рыба взята 6.06.2003 г., возраст рыбы 2+ — 3+;
 г — гольяна отловили 8.06.2003 г., возраст гольяна 2+ — 3+

По оси абсцисс — натуральные логарифмы порядковых номеров последовательных (по значениям условных биомасс) членов ряда; по оси ординат — натуральные логарифмы значений условных биомасс видов паразитов, образующих компонентное сообщество. Прямые, параллельные оси абсцисс — теоретически рассчитанные критические уровни.

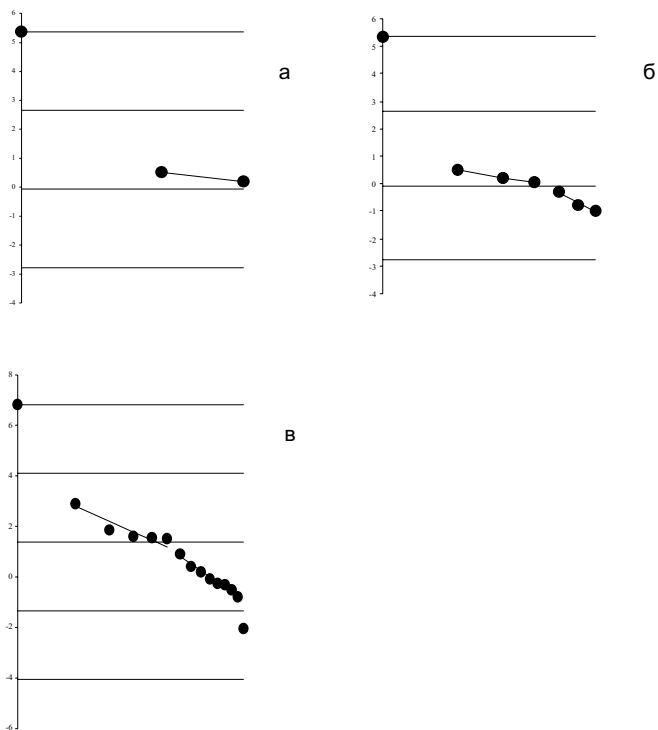


Рис. 2. Вариационные кривые условных биомасс паразитов голяна обыкновенного разного возраста из русла р. Печоры в районе устья р. Гаревки (рыба отловлена 15.08.2003 г.):
а — возраст голяна 0+; б — возраст рыбы 1+; в — возраст голяна 3+.
Обозначения как на рис. 1

Таблица 1

Паразитофауна голяна разного возраста из русла р. Печоры у п. Якша
(Table 1. The parasitofauna of the different ages Phoxinus phoxinus from Pechora river beside Jaksha settlement (Central homestead))

Вид паразита	Возраст рыбы и даты ее отлова			
	0+	2+ - 3+		
	16.08.2001	30.06.2000	6.06.2003	8.06.2003
<i>Myxidium rhodei</i> Leger, 1905	1(1)	-	-	3(1-8)
<i>Myxobolus musculi</i> Keysseltz, 1908	-	-	3(3-9)	2(11-18)
<i>M. lomi</i> Donec et Kulakowskaja, 1962	-	-	3(6-8)	4(2-22)
<i>Trichodina</i> sp	-	-	+	+
<i>Dactylogyrus borealis</i> Nybelin, 1936	-	1(1)	1(1)	3(1-1)
<i>Gyrodactylus aphyae</i> Malmberg, 1957	-	(8)	(2.27)	(10.5)
<i>G. macronychus</i> Malmberg, 1957	-	(2)	(0.67)	(1.9)
<i>G. limneus</i> Malmberg, 1964	-	(5)	(0.13)	(0.4)
<i>G. laevis</i> Malmberg, 1957	-	-	-	(0.07)
<i>G. pannonicus</i> Molnar, 1968	-	-	-	(0.13)
<i>G. magnificus</i> Malmberg, 1957	-	(2)	(0.93)	(1.07)
<i>Schistocephalus nemachili</i> Dubinina, 1959 (larvae).	-	1(1)	1(1)	-
<i>Phyllodistomum folium</i> (Olbers, 1926)	-	3(1-5)	2(1-3)	7(1-3)
<i>Allocreadium isoporum</i> (Looss, 1894)	1(1)	6(1-4)	7(1-2)	5(1-3)
<i>Diplostomum phoxini</i> Faust, 1918 larvae	15(2-48)	20(9-96)	15(4-43)	15(4-126)
<i>Rhipidocotyle campanula</i> (Dujardin, 1845)	15(7-38)	20(21-499)	15(13-66)	15(3-141)
<i>Rhabdochona phoxini</i> Moravec, 1968	-	-	-	1(1)
<i>Raphidascaris acus</i> (Bloch, 1779) larvae	-	4(1-4)	10(1-4)	4(1-5)
<i>Neoechinorhynchus rutili</i> (Muller, 1780)	-	1(1)	4(1-2)	6(1-5)
<i>Unionidae</i> gen. sp	-	-	2(1-1)	4(1-5)

Примечание. Здесь и далее за скобками число зараженных данным видом паразита рыб; в скобках — интенсивность инвазии или индекс обилия.

Таблица 2

**Паразитофауна голяна разного возраста из русла р. Печоры
в районе устья р. Гаревки**
(Table 2. The parasitofauna of the different ages *Phoxinus phoxinus* from
Pechora river in the region of the mouth of Garevka river)

Вид паразита	Возраст рыбы		
	0+	1+	3+
<i>Myxidium rhodei</i> Leger, 1905	-	1(1)	2(1-3)
<i>Myxobolus bramae</i> Reuss, 1906	-	-	3(1-3)
<i>M. musculi</i> Keysselitz, 1908	-	4(1-2)	4(1-2)
<i>M. lomi</i> Donec et Kulakowskaja, 1962	-	2(1-2)	4(1-5)
<i>Dactylogyrus borealis</i> Nybelin, 1936	-	-	4(1-13)
<i>Gyrodactylus aphyae</i> Malmberg, 1957	-	-	(21)
<i>G. laevis</i> Malmberg, 1957	-	-	(1)
<i>G. limneus</i> Malmberg, 1964	-	-	(3)
<i>G. pannonicus</i> Molnar, 1968	-	-	(4)
<i>Phyllodistomum folium</i> (Olbers, 1926)	-	1 (2)	3(1-2)
<i>Diplostomum phoxini</i> Faust, 1918 larvae	15(3-47)	15(22-236)	15(88-1061)
<i>Apatemon</i> sp. larvae	5(2-5)	-	-
<i>Rhabdochona phoxini</i> Moravec, 1968	-	-	1(1)
<i>Philometra abdominalis</i> Nybelin, 1928	-	-	1(1)
<i>Raphidascaaris acus</i> (Bloch, 1779) larvae	2(1-2)	6(1-5)	5(1-2)
<i>Neoechinorhynchus rutili</i> (Muller, 1780)	-	1(1)	5(1-2)

Таблица 3

Приведенные линейные размеры (мм) паразитов голяна разного возраста из р. В. Печоры в районе п. Якша
 (Table 3. The brought linear dimensions (mm) of the parasites of the different ages Phoxinus phoxinus
 from Pechora river beside Jaksha settlement)

Вид паразита	Средние размеры			I	Возраст рыбы и даты ее отлова							
					0+		2+ - 3+					
	L	B	H		16.08.2001 г.		30.06.2000 г.		6.06.2003 г.		8.06.2003 г.	
					N	ln (IN)	N	ln (IN)	N	ln (IN)	N	ln (IN)
<i>Myxidium rhodei</i>	0.6	0.3	0.3	0.38	1	-0.973	-	-	0	-	13	1.59
<i>M. musculi</i>	0.84	0.13	0.13	0.24	0	-	0	-	17	1.41	29	1.95
<i>M. lomi</i>	0.6	0.16	0.16	0.25	0	-	0	-	20	1.60	40	2.30
<i>Dactylogyrus borealis</i>	0.80	0.20	0.11	0.26	0	-	1	-1.35	1	-1.35	3	-0.25
<i>Gyrodactylus aphyae</i>	0.60	0.17	0.10	0.22	0	-	8	0.55	34	2.00	158	3.53
<i>G. macronychus</i>	0.45	0.13	0.07	0.16	0	-	2	-1.14	10	0.47	29	1.53
<i>G. laevis</i>	0.35	0.1	0.06	0.13	0	-	0	-	0	-	1	-2.06
<i>G. limneus</i>	0.40	0.12	0.07	0.15	0	-	5	-0.29	2	-1.21	6	-0.11
<i>G. pannonicus</i>	0.40	0.12	0.07	0.15	0	-	0	-	0	-	2	-1.21
<i>G. magnificus</i>	0.60	0.17	0.10	0.22	0	-	2	-0.84	14	1.11	16	1.24
<i>Schistocephalus nemachili l.</i>	150	7	1.9	12.6	0	-	1	2.53	1	2.53	0	-
<i>Phyllostomum folium</i>	0.60	0.25	0.08	0.23	0	-	9	0.72	4	-0.09	11	0.92
<i>Allocreadium isoporum</i>	0.42	0.24	0.06	0.18	1	-1.703	10	0.60	8	0.38	10	0.60
<i>Diplostomum phoxini l.</i>	0.30	0.20	0.06	0.15	262	3.693	812	4.82	311	3.86	627	4.57
<i>Rhipidocotyle campanula l.</i>	0.64	0.33	0.10	0.28	239	4.191	3838	6.97	497	4.92	825	5.43
<i>Rhabdochona phoxini</i>	11.5	0.20	0.20	0.77	0	-	0	-	0	-	1	-0.26
<i>Raphidascaris acus l.</i>	1.28	0.03	0.03	0.11	0	-	8	-0.18	22	0.84	11	0.14
<i>Neoechinorhynchus rutili</i>	2.50	0.70	0.70	1.07	0	-	1	0.07	5	1.68	14	2.71
<i>Unionidae gen. sp.</i>	0.12	0.12	0.12	0.120	0	-	0	-	2	-1.43	13	0.44

Таблица 4

Коэффициенты уравнений регрессии, характеризующих сообщества паразитов гольяна разного возраста из р. Печоры у п.Якша

(Table 4. The coefficients of equations of regression, characterizing the communities of the parasites of the different ages Phoxinus phoxinus from Pechora river beside Jaksha settlement)

Возраст рыбы	Даты отлова рыбы	Уровни	a_0	a_1	$m_{y,x}$
0+	16.08.2001	первый	5.834	-1.392	-
		второй	-	-	-
		третий	-	-	-
		сумма	5.834	-1.392	-
2+ - 3+	30.06.2000	первый	2.253	-0.323	-
		второй	-	-	-
		третий	1.927	-0.462	0.115
		сумма	4.181	-0.785	0.115
	6.06.2003	первый	2.290	-0.449	0.119
		второй	2.528	-0.461	0.084
		третий	1.799	-0.632	0.014
		сумма	6.617	-1.543	0.217
	8.06.2003	первый	2.805	-0.495	0.148
		второй	2.645	-0.420	0.052
		третий	2.752	-0.067	-
		сумма	8.203	-0.983	0.200

Примечание: a_0 , a_1 — коэффициенты уравнения регрессии; $m_{y,x}$ — ошибка уравнения регрессии.

Таблица 5

**Характеристика компонентных сообществ паразитов голяна разного
возраста из р. В. Печоры у пос. Якша**

(Table 5. Characteristic of the component communities of the parasites
of the different ages *Phoxinus phoxinus* from Pechora river beside Jaksha
settlement)

Показатели	Даты отлова рыбы			
	16.08.2001	30.06.2000	6.06.2003	8.06.2003
Исследовано рыб	15	20	15	15
Возраст рыбы	0+	2+ -3+	2+ -3+	2+ -3+
Общее число видов паразитов	4	12	15	18
Общее число особей паразитов	503	4697	948	1809
Общее значение условной биомассы	106.8	1207.2	229.6	413.3
Количество автогенных видов	3	10	13	17
Количество аллогенных видов	1	2	2	1
Доля особей автогенных видов	0.479	0.827	0.671	0.653
Доля биомассы автогенных видов	0.624	0.886	0.738	0.765
Доля особей аллогенных видов	0.521	0.173	0.329	0.347
Доля биомассы аллогенных видов	0.376	0.114	0.262	0.235
Количество видов специалистов	1	6	7	10
Доля особей видов специалистов	0.521	0.177	0.414	0.488
Доля биомассы видов специалистов	0.376	0.106	0.284	0.366
Количество видов-генералистов	3	6	8	8
Доля особей видов-генералистов	0.479	0.823	0.586	0.512
Доля биомассы видов-генералистов	0.624	0.894	0.716	0.634
Доминантный вид по числу особей	<i>Diplostomum phoxini</i>	<i>Rhipidocotyle campanula</i>	<i>Rhipidocotyle campanula</i>	<i>Rhipidocotyle campanula</i>
Доминантный вид по значению биомассы	<i>Rhipidocotyle campanula</i>	<i>Rhipidocotyle campanula</i>	<i>Rhipidocotyle campanula</i>	<i>Rhipidocotyle campanula</i>
Характеристика доминантного вида	ал/с; ав/г	ав/г	ав/г	Ав/г
Индекс Бергера-Паркера по числу особей	0.521	0.817	0.524	0.456
Индекс Бергера-Паркера по биомассе	0.619	0.879	0.598	0.552
Выравненность видов по числу особей	0.518	0.215	0.482	0.499
Выравненность видов по биомассе	0.502	0.180	0.503	0.496
Индекс Шеннона по числу особей	0.718	0.535	1.306	1.442
Индекс Шеннона по значениям биомассы	0.698	0.448	1.362	1.439

Примечание: ал — аллогенный вид; ав — автогенный вид; с — вид-специалист; г — вид-генералист.

Таблица 6

Приведенные линейные размеры (мм) паразитов голяна разного возраста из р. В. Печоры в устье р. Гаревки
(Table 6. The brought linear dimensions (mm) of the parasites of the different ages Phoxinus phoxinus from Pechora river
in the region of the mouth of Garevka river)

Вид паразита	Средние размеры			l	Возраст рыбы					
					0+		1+		3+	
					n=15		n=15		n=15	
	L	B	H		N	ln (IN)	N	ln (IN)	N	ln (IN)
<i>Myxidium rhodei</i>	0.6	0.3	0.3	0.378	-	-	1	-0.973	4	0.413
<i>M. bramae</i>	4.5	4.5	4.5	4.500	-	-	-	-	4	2.890
<i>M. musculi</i>	0.84	0.13	0.13	0.242	-	-	5	0.191	5	0.191
<i>M. lomi</i>	0.6	0.16	0.16	0.249	-	-	3	-0.293	10	0.911
<i>Dactylogyrus borealis</i>	0.8	0.2	0.11	0.260	-	-	-	-	18	1.544
<i>Gyrodactylus aphyae</i>	0.6	0.17	0.1	0.217	-	-	-	-	21	1.516
<i>G. laevis</i>	0.35	0.1	0.06	0.128	-	-	-	-	1	-2.055
<i>G. limneus</i>	0.4	0.12	0.07	0.150	-	-	-	-	3	-0.80
<i>G. pannonicus</i>	0.4	0.12	0.07	0.150	-	-	-	-	4	-0.512
<i>Phyllodistomum folium</i>	0.6	0.25	0.08	0.229	-	-	2	-0.781	4	-0.088
<i>Diplostomum phoxini l.</i>	0.3	0.2	0.06	0.153	384	4.075	1401	5.369	5999	6.824
<i>Apatemon sp. l.</i>	0.66	0.34	0.06	0.238	17	1.397	-	-	-	-
<i>Rhabdochona phoxini</i>	11.5	0.2	0.2	0.772	-	-	-	-	1	-0.259
<i>Philometra abdominalis</i>	120	1	1	4.932	-	-	-	-	1	1.596
<i>Raphidascaris acus l.</i>	1.28	0.03	0.03	0.105	3	-1.16	16	0.517	7	-0.310
<i>Neoechinorhynchus rutili</i>	2.5	0.7	0.7	1.070	-	-	1	0.068	6	1.859

Таблица 7

Коэффициенты уравнений регрессии, характеризующих сообщества паразитов гольяна разного возраста из р. Печоры в устье р. Гаревки

(Table 7. The coefficients of equations of regression, characterizing the communities of the parasites of the different ages *Phoxinus phoxinus* from Pechora river in the region of the mouth of Garevka river)

Возраст хозяина	Уровни	a_0	a_1	$m_{y \cdot x}$
0+	первый	-	-	-
	второй	1.336	-1.244	-
	сумма	1.336	-1.244	-
1+	первый	-	-	-
	второй	1.461	-1.481	0.077
	третий	2.302	-0.471	0.047
	сумма	3.762	-1.953	0.124
3+	первый	-	-	-
	второй	2.595	-0.680	0.207
	третий	2.302	-0.437	0.040
	сумма	4.897	-1.117	0.248

Таблица 8

**Характеристика компонентных сообществ паразитов голяна речного
разного возраста из р. Печоры в районе устья р. Гаревки**

(Table 8. Characteristic of the component communities of the parasites
of the different ages *Phoxinus phoxinus* from Pechora river in the region
of the mouth of Garevka river)

Показатели	Возраст рыбы		
	0+	1+	3+
Исследовано рыб	15	15	15
Общее число видов парази- тов	3	7	15
Общее число особей пара- зитов	404	1429	6088
Общее значение условной биомассы	63.21	220.26	966.81
Количество автогенных видов	1	6	14
Количество аллогенных видов	2	1	1
Доля особей автогенных видов	0.007	0.020	0.015
Доля биомассы автогенных видов	0.005	0.025	0.049
Доля особей аллогенных видов	0.993	0.980	0.985
Доля биомассы аллогенных видов	0.995	0.975	0.951
Количество видов специа- листов	1	2	8
Доля особей видов специа- листов	0.950	0.983	0.995
Доля биомассы видов спе- циалистов	0.931	0.978	0.965
Количество видов генера- листов	2	5	7
Доля особей видов генера- листов	0.050	0.017	0.005
Доля биомассы видов гене- ралистов	0.069	0.022	0.035
Доминантный вид по числу особей	<i>Diplostomum phoxini</i>	<i>Diplostomum phoxini</i>	<i>Diplostomum phoxini</i>
Доминантный вид по значе- нию биомассы	<i>Diplostomum phoxini</i>	<i>Diplostomum phoxini</i>	<i>Diplostomum phoxini</i>
Характеристика доминант- ного вида	ал/с	ал/с	ал/с
Индекс Бергера-Паркера по числу особей	0.951	0.980	0.985
Индекс Бергера-Паркера по биомассе	0.931	0.975	0.951

Показатели	Возраст рыбы		
	0+	1+	3+
Выравненность видов по числу особей	0.198	0.063	0.041
Выравненность видов по биомассе	0.245	0.082	0.109
Индекс Шеннона по числу особей	0.218	0.122	0.110
Индекс Шеннона по значениям биомассы	0.269	0.160	0.294

Н.А. Мойсеенко, Н.Б. Петрова, Ж.Е. Иванкова, Е.Н. Репина
Сыктывкарский госуниверситет

**Действие фитозкдистероидов на количественные
и качественные показатели крови млекопитающих в норме
и при экспериментальных воздействиях**

*Комплексные исследования 20-гидроксиэкдизона из *Serratula coronata* L. на показатели красной и белой крови крыс в норме и при экспериментальной анемии показали высокие адаптогенные и иммуностимулирующие свойства этого вещества.*

20-гидроксиэкдизон не только нивелировал негативное влияние физиологического раствора (0,9% NaCl) (его растворителя), но и улучшал качественные и количественные характеристики крови, способствовал «нормализации» картины крови при фенилгидразиновой анемии.

Поиск и создание новых классов лекарственных средств с улучшенными фармакологическими свойствами составляют одно из актуальных направлений медико-биологической науки (Швец и др., 1997). Фитозкдистероиды — полигидроксилированные стероидные соединения, аналоги гормонов линьки и метаморфоза насекомых — являются одной из наиболее перспективных групп для изучения и использования в качестве адаптогенных лекарственных средств и тонизирующих иммуностимулирующих пищевых добавок. В настоящее время выявлен широкий спектр потенциально положительных эффектов этих соединений, однако механизмы действия их на организм теплокровных животных еще далеки от своего разрешения. Комплексных работ по влиянию 20-гидроксиэкдизона (20E) (одного из наиболее распространенных представителей фитозкдистероидов) на морфофункциональные, физико-химические параметры крови до сих пор не проводилось, хотя состав и свойства крови в целом и отдельных его компонентов являются своеобразным экраном ситуации, складывающейся в организме в норме и при самых разных (физиологических и патологических) воздействиях на организм. Рецепторы, имеющиеся в клетках крови, реагируя на разнообразные физические, химические, гормональные влияния, отражают функциональное состояние соответствующих рецепторов в других тканях и органах (сосуды, сердце и др.). Поэтому изучение структуры и свойств крови является обязательным при любых клинических обследованиях и весьма значимы при изучении клеточно-молекулярных механизмов действия тех или иных биологически активных соединений.

Цель настоящей работы — исследовать влияние препарата экдистероидов из растений *Serratula coronata* L. на количественные, морфофункциональные, физико-химические характеристики крови и ее составляющих, состояние симпато-адреналовой системы (САС) — основ-

ной системы неспецифической адаптации в норме и при экспериментальном воздействии (анемии).

Эксперименты проведены на 3-4-месячных крысах-самцах линии Wistar (количество 265, масса $166,9 \pm 24,7$ г). Препарат экдистероидов выделен из надземной части растений Серпухи венценосной (*Serratula coronata* L.), интродуцированной в условиях Европейского Северо-Востока России, в лаборатории биохимии и биотехнологии растений (зав. лаб., д-р биол. наук В.В. Володин) Института биологии Коми НЦ УрО РАН (Володин, Володина, 2000) и содержит не менее 80 % 20Е, 11 % инокостерона, 5 % экдизона. Готовили 0,3-процентный раствор 20Е в 0,9 % NaCl (стерильный для инъекций). В качестве контроля использовали 0,9 % NaCl. Оба препарата вводили в/м. Гемолитическую анемию вызывали п/к введением 2,5-процентного раствора фенилгидразина (ФГ) в 0,9 % NaCl (рН=7,4) в течение 3 дней, суммарная доза 15 мг/кг (Стародуб, 1974). Кровь брали методом тотального обескровливания путем декапитации после легкого хлороформного наркоза, стабилизировали гепарином (раствор для инъекций 5000 ЕД в 1 мл, производство Московского эндокринного завода) в разведении 1:1 в 0,9 % NaCl. Параметры красной и белой крови определяли по общепринятым в клинике и лаборатории методам (Тодоров, 1963; Шиффман, 2000). Состояние САС оценивали с использованием методов кислотного гемолиза и фитогемагглютинации (ФГА) эритроцитов (Эр) в присутствии пропранолола (коммерческое название — обзидан) (Голенда и др., 1994; Петрова, Канева, 1997; Петрова и др., 1999). Фитогемагглютинацию (ФГА) Эр исследовали по методу Н.А. Мойсеенко, Л.И. Иржака (1972). Проведено несколько серий экспериментов: однократное введение 20Е в дозе 20 мг/кг с забором крови через 2 и 24 ч, длительное (многократное введение 20Е в дозе 5 мг/кг ежедневно в течение 5 дней, суммарная доза 25 мг/кг), в норме и на фоне вызванной гемолитической анемии. Крыс делили на 4 группы: опытную (вводили 20Е), контрольную (вводили соответствующий объем 0,9 % NaCl: при дозе 20Е 5 мг/кг — 1,67 мл/кг, при 20 мг/кг — 6,67 мл/кг), фенилгидразиновую (вводили ФГ) и интактную.

Однократное действие 20Е и физиологического раствора (0,9% NaCl) (экспозиция 2 и 24 ч) на количественные и качественные показатели красной крови

Показано, что 20Е уже через 2 ч после введения стимулирует эритропоэз у крыс, что выражается в увеличении доли ($\%_0$) и абсолютного количества ($\text{млн}/\text{мм}^3$) ретикулоцитов (Rtc) и в ускорении их созревания, о чем свидетельствует правый сдвиг ретикулоцитарной формулы по Гейльмейеру (рис 1). Увеличивается общая концентрация гемоглобина (Hb) в крови и насыщенность им Эр, что свидетельствует об активиза-

ции биосинтетических процессов в Эр. Дело в том, что субстанция *reticulo-filaventosa* в Rtc — активные полирибосомы. Ранее было обнаружено, что 20E стимулирует синтез белка и РНК в клетках печени (Тодоров и др., 2000). Несомненно снижается вязкость крови, а скорость оседания Эр (СОЭ) увеличивается, отражая изменения в концентрации Эр, Hb и показателя гематокрита (Ht). Зависимость вязкости крови и СОЭ от перечисленных параметров хорошо известна (Катюхин, 1995; Ямайкина, Фурманчук, 1999).

Обнаружено, что под действием 20E изменяются такие физико-химические свойства мембраны Эр, как кислотная резистентность и агглютинабельность. У самцов крыс отмечалось увеличение продолжительности кислотного гемолиза, в то время как у самок параметры кислотного гемолиза не изменялись. Отмечалось снижение реакции агглютинации у самцов на 20-й, у самок — на 20-й и 30-й минутах наблюдения. Полагаем, что это связано с увеличением доли молодых клеток в популяции Эр в результате стимуляции эритропоэза, а фитостероиды оказывали свой мембраностабилизирующий эффект прежде всего на зрелые Эр, уже циркулирующие в кровяном русле и имеющие сложившуюся архитектуру поверхностного аппарата.

На мембране Эри обнаружены 2 пула I_2 -адренорецепторов (Манухин и др., 1994). Состояние I-адренорецепторов в Эр оценивали по сдвигу кривой кислотного гемолиза и реакции ФГА в присутствии обзидана — высокоэффективного неселективного блокатора I-адренорецепторов. Ранее показано, что обзидан *in vitro* вызывал снижение ФГА и кислотной резистентности Эр крыс (Петрова и др., 1999). У интактных животных независимо от пола эффект обзидана максимален на первых минутах наблюдения, что свидетельствует об отсутствии чрезмерной активации САС. Сохраняется четкая линейная зависимость эффекта от времени (со временем эффект обзидана снижается (рис. 2 А, 3 А). При кратковременном (2 ч) действии 20E отмечалась высокая реакция Эр на обзидан у самцов и самок, что указывает на неактивированное состояние САС, отсутствие значительной стресс-реакции и достаточно большой пул свободных от катехоламинов I-адренорецепторов (рис. 2 Е, 3 Е). У самок крыс сохраняется четкая линейная зависимость эффекта обзидана от времени, что указывает на то, что 20E способствует сохранению относительно стабильного функционального состояния I-адренорецепторов на мембране Эр.

Иначе реагирует красная кровь на введение физиологического раствора (0,9% NaCl). Наряду с уменьшением количества Эр и Ht снижается и концентрация Hb. Уменьшение средноклеточных объема и толщины клеток указывает на появление в циркуляции более мелких Эр. Очевидно, это вклад в циркулирующую популяцию Эр депо. Известно, что Эр депо более мелкие и содержат соответственно меньше Hb (Щерба, 1968). Концентрация Rtc возрастает в основном за счет Rtc (III ста-

дии зрелости), поэтому, возможно, это результат выброса в циркуляцию незрелых элементов из синусов красного костного мозга. Кислотная резистентность общей популяции Эр снижается, агрегационная способность их при этом увеличивается. Отмеченные изменения в количественных и качественных характеристиках красной крови свидетельствуют о том, что введение физиологического раствора является сильным стрессорным фактором. Действительно, при введении NaCl (контрольная группа) отмечается минимальный эффект обзидана и нарушение линейной зависимости эффекта I-блокатора обзидана, что указывает на активацию САС и изменение состояния I-адренорецепторов на мембране Эр (рис. 3 С, 4 С).

Через 24 ч после введения 20Е наряду с повышением общей концентрации Hb увеличивается и концентрация Эр без адекватного повышения показателя Ht. Последнее может быть обусловлено снижением среднеклеточного объема Эр. Известно, например, что молодые Эр более плоские, чем старые. Таким образом, сохраняется стимулирующее влияние 20Е на эритропоэз. Возможно, снижаются и процессы эритродиереза. Кислотная резистентность Эр повышена, а агглютинабельность снижена.

Эффект обзидана в опытных группах напоминает таковой в интактной группе животных и даже превышает его, что свидетельствует об отсутствии значительной стресс-реакции и повышенной стресс-устойчивости. Так, при оценке адренореактивности Эр по сдвигу кислотной эритрограммы выявлено, что эффект обзидана превышает таковой в интактной группе по основным временным параметрам: общее время гемолиза увеличено на 13% ($p < 0,05$), время максимума гемолиза — на 59% ($p < 0,05$), время полураспада Эр на 46% ($p < 0,05$). Таким образом, 20Е предотвращает чрезмерную активацию САС и изменение адренореактивности ткани, вероятно, за счет неспецифического мембраностабилизирующего действия. Поскольку зрелые Эр — безъядерные клетки, очевидно, это влияние может осуществляться внегеномно на мембранные сопрягающие факторы и внутриклеточные механизмы трансдукции гормонального сигнала. Возможность перестроек в структуре белково-липидного комплекса поверхностной мембраны Эр под влиянием C_{27} -стероидов, к числу которых относится 20Е, показана в работе А.В. Тугановой, А.В. Коцюрубы (1996) и подтверждена нами.

При введении NaCl через 24 ч после введения 20Е обнаружена тенденция к снижению концентрации Эр с одновременным увеличением их среднеклеточного объема, что влечет за собой увеличение показателя Ht.

Таким образом, в ответ на введение 20Е и 0,9% NaCl количественные и качественные показатели красной крови меняются противоположным образом. Введение 20Е способствует сгущению крови, активируя эритропоэз и снижая эритродиерез. NaCl приводит к гидратации

Эр, их сферуляции и, как следствие, к разбавлению крови. Возможно, последнее — ответ на действие стрессорного фактора — гидремическая фаза — вход в циркулирующее русло внеклеточной жидкости для поддержания гомеостатических характеристик газового состава, кислотно-основного состояния крови и артериального давления. Кислотная резистентность Эр при введении NaCl снижается, агглютинабельность возрастает, но в меньшей степени, чем через 2 ч после инъекции, что, очевидно, отражает сохранение дисбаланса между эритропозом и эритродиерезом: скорость кроверазрушения еще превышает кроветворение.

Активация САС при введении NaCl через 24 ч остается повышенной по сравнению с интактными крысами, хотя и менее выраженной, чем через 2 ч после инъекции. Вероятно, временной фактор (2 и 24 ч) играет не последнюю роль в стабилизации мембраны Эр и состояния крови в целом в ответ на действие стрессорного фактора.

Множественное действие 20Е и физиологического раствора (0,9% NaCl) (5 суток) в суммарной дозе 25 мг/кг на количественные и качественные показатели красной крови

Через 5 суток после ежедневных инъекций 20Е картина красной крови крыс близка к таковой у интактных. Повышены общее содержание Hb в крови и насыщенность им Эр, высокая СОЭ. Увеличенный средnekлеточный объем Эр привел к увеличению показателя Ht в отличие от разовой инъекции. В крови в большем количестве, чем после разовой инъекции, содержатся Rтс с признаками ускоренного созревания. Кислотная резистентность Эр самцов повышена, у самок — близка к резистентности у интактных. Агглютинабельность Эр у опытных крыс значительно снижена по сравнению с интактными и особенно с контрольной группой крыс. Более чувствительны к воздействию 20Е (судя по реакции ФГА) оказались самки. Возможно, это связано с различиями в мембранных структурах. Так, известно, что эритроцитарная мембрана самцов более богата насыщенными жирными кислотами, поэтому жесткость ее выше (Новгородцева и др., 2002). Экдизон, вызывая перестройки в белково-липидной структуре мембраны, изменяет уровень ненасыщенных жирных кислот (Туганова, Коцюруба, 1996) и, таким образом, изменяет поверхностные свойства мембраны, снижая их агглютинабельность.

САС у опытных крыс неактивирована, однако стресс-резистентность Эр увеличена, о чем свидетельствует большая выраженность эффекта обзидана на реакцию агглютинации Эр, чем у интактных животных (рис. 2 Д, 3 Д). Предполагается, что 20Е при длительном влиянии может действовать через геном на стволовые клетки миелоидного ростка, активируя синтез интегральных и рецепторных белков, в том числе и

I-адренорецепторов. С увеличением пула свободных I-адренорецепторов увеличивается и реакция на обзидан *in vitro*.

В ответ на 5-кратное введение NaCl отмечается увеличение среднечелюстного объема Эр и показателя Ht. Вязкость крови соответствует уровню у интактных животных, однако увеличивается вязкость плазмы, СОЭ и содержание Rtc. Налицо признаки ускоренного созревания Эр, хотя и менее выраженные по сравнению с опытной группой (введение 20Е). Кислотная резистентность Эр не отличается от интактной группы, агглютинабельность Эр выше, чем в интактной группе. САС находится в активированном состоянии САС, эффект обзидана ниже, чем в интактной и опытных группах. Перечисленные изменения в состоянии крови подтверждают наше предположение о том, что действие NaCl сходно с действием стрессорных факторов, таких, как кровопотеря, физическая нагрузка и др., приводящих к сильным «возмущениям» как в системе крови, так и во всем организме. При многократном введении NaCl в организме происходят изменения, напоминающие «фазу костномозгового кроветворения», которая сменяет гидремическую фазу (действие NaCl — 24 ч).

Действие 20Е и физиологического раствора (0,9% NaCl) на количественные и качественные показатели белой крови крыс (одно- и многократные воздействия)

У интактных крыс количество лейкоцитов находится в пределах их физиологической нормы $8,7 \pm 0,12$ тыс/мкл. Различия по полу отсутствуют. При однократном введении 20Е и NaCl через 2 ч отмечается значительное повышение количества лейкоцитов: в 2 раза в ответ на введение 20Е и в 1,6 раза — на введение NaCl. Скорее всего, это увеличение отражает активацию неспецифических реакций организма, которые включают в себя выброс лейкоцитов из депо тимуса, лимфатических узлов, печени и активацию процессов пролиферации в миелоидном ростке. При многократном введении 20Е общее количество лейкоцитов увеличивается на 19 % у самцов, на 26 % у самок. При многократном введении NaCl отмечается противоположная реакция — количество лейкоцитов снижается на 36% и 38% у самцов и самок соответственно.

При однократном кратковременном (2 ч) действии 20Е и NaCl отмечаются сходные изменения и в качественном составе лейкоцитов: выраженный нейтрофилез, снижение количества эозинофилов, лимфоцитов и моноцитов (рис. 6). Снижение количества эозинофилов более выражено у самок. Обнаруженные изменения обусловлены, по-видимому, значительной активацией неспецифических клеточных механизмов защиты (Агаджанян и др., 1992). Длительное введение 20Е и NaCl оказывает на параметры белой крови противоположные эффекты. При

введении NaCl в течение 5 дней общее количество лейкоцитов снижается на 38 % по сравнению с интактной группой крыс. Лейкопения может быть отражением сниженного лейкопоэза и (или) значительной гибели белых кровяных клеток. Лейкопения — признак сниженного иммунологического статуса. Повышенным оставался % содержания нейтрофилов, а % содержания эозинофилов и лимфоцитов снижались. Лимфопения может быть вызвана миграцией и гибелью лимфоцитов в тканях, нуждающихся в трофической поддержке (Зеленина и др., 2000). При многократном введении 20E общее количество лейкоцитов приближено к норме, хотя и увеличено на 19 % у самцов ($p < 0,01$) и на 26 % ($p < 0,01$) у самок (рис. 6). На этом фоне отмечено снижение % содержания в крови эозинофилов и моноцитов ($p < 0,01$) по сравнению с интактной группой. Скорее всего, это связано с активацией реакций длительного действия в организме животных (III эшелон защиты по Мечникову).

Таким образом, однократное кратковременное действие 20E и NaCl приводят к активации неспецифических защитных реакций в организме животных, проявляющейся в сдвигах лейкоцитарной формулы. Тем не менее при введении 20E лейкоцитарная формула оказывается более приближена к показателям белой крови интактных животных, чем при введении NaCl, что может говорить о благоприятном «нормализующем» действии 20E на белую кровь крыс.

Длительное введение 20E и NaCl привело к иным результатам. При введении NaCl отмечается снижение защитных механизмов с сохранением неспецифических клеточных реакций иммунитета. При введении 20E активировались защитные механизмы длительного действия с сохранением высокого иммунологического статуса. Следовательно, многократные введения фитостероидов в малой дозе эффективно повышали иммунологическую резистентность организма, что открывает новые перспективы для использования этих веществ как хороших иммуностимуляторов.

Параметры крови при действии 20E и физиологического раствора (0,9 % NaCl) на фоне фенилгидразиновой анемии

Анемия — состояние, характеризующееся чаще всего уменьшением концентрации Hb и Эр в крови, что затрудняет выполнение ими их основной функции — транспорта газов. Гемолитические анемии составляют группу анемий, обусловленных сокращением продолжительности средней жизни Эр (Ужанский, 1968). В механизме вызванных, приобретенных анемий (к которым относится и ФГ анемия) большую роль играют изменения структуры мембраны Эр и содержащегося в них Hb. Показано, что под действием ФГ (сильный гемолитический яд) в Эр образуются гемихромы (продукты катаболизма Hb). Сродство гемихромов к участку цитоплазматического домена белка полосы 3 эритроци-

тарной мембраны выше, чем у нативной формы Hb. Связывание гемихромов с трансмембранным белком полосы 3 (капнофорином) приводит к образованию крупных кластеров и вызывает необратимые изменения в мембране Эр. Этот процесс является сигналом для лизиса Эр *in vivo*, поскольку стимулирует образование аутоантител, сайты узнавания для которых на поверхности Эр локализируются в эпитопе белка полосы 3 (Молчанова, 1989). В нашем исследовании ФГ (и развивающаяся на его фоне анемия) используется как фактор, губительно действующий на мембрану клеток, с одной стороны, и, с другой — как фактор, стимулирующий эритропоэз, позволяющий оценить действие 20E как гематопротекторного средства.

Показано, что у крыс фенилгидразиновой группы (получали только ФГ) увеличена скорость оседания Эр ($P < 0,05$), понижена вязкость крови ($P < 0,05$), концентрация Hb и показатель Ht по сравнению с интактными, что является типичным для данного вида анемий. В крови наблюдается ретикулоцитоз (увеличены относительная (%_о) и абсолютная (млн/мм³) концентрации ретикулоцитов в среднем на 300 %), а также присутствуют (1,7 %) ретикулоциты II стадии зрелости по Гейльмейеру, которые не встречались у интактных животных. В крови крыс присутствуют Эр, содержащие тельца Гейнца, которые образуются в результате действия ФГ на клетку. Известно, что доля Эр с тельцами Гейнца, характерными для гемолитических анемий, является индикатором глубины анемии (Ужанский, 1968).

При экспериментальной анемии, вызванной ФГ, отмечается повышение агглютинабельности и кислотной резистентности Эр крыс. Параметры кислотного гемолиза и ФГА Эр крыс, которым вводили 20E на фоне ФГ, максимально приближены к этим показателям у интактной группы (рис. 5). Известно, что ФГ усиливает эритроцитобразование с появлением менее жизнеспособных Эр. ФГ повышает активность ферментов сарколеммальной мембраны, нарушает обмен биогенных аминов, что приводит к конформационным перестройкам рецепторов клетки — мишени (Середенко и др., 1987; Заварзин, 1992). Вероятно, это касается и рецепторов для лектинов и β -адренорецепторов, присутствующих на мембране Эр. Известно, что ФГ ускоряет метаболизм клеток, нарушает проницаемость мембраны для ионов, препятствует нормальному транспорту питательных веществ (Рубина, 1985; Молчанова, 1989). Эти изменения приводят к повышенной агглютинабельности Эр под действием ФГ.

На рисунке 4 А-В показана выраженность эффекта обзидана у различных групп экспериментальных животных при использовании метода ФГА. ФГ, выступая в качестве стрессорного фактора, вызывает активацию САС. САС способствует выбросу большого количества катехоламинов, которые взаимодействуют со свободными адренорецепторами, вследствие чего эффект обзидана снижается (рис. 4 А). Кроме того,

можно предположить, что изменяется и чувствительность Эр к катехоламинам, о чем свидетельствует резкое нарушение линейной зависимости эффекта обзидана от времени его действия. Достоверных различий между параметрами реакции агглютинации Эр после добавления обзидана в контрольной (крысам вводили физиологический раствор) и фенилгидразиновой группах обнаружено не было.

Наибольший эффект обзидана наблюдается при действии 20Е на фоне ФГ на 10 и 20 мин реакции ФГА и равняется таковому в интактной группе (рис. 5 В). Обзидан снижает реакцию на 10-й мин на 26 % ($P < 0,001$); на 20-й мин — на 19 % ($P < 0,001$); на 30-й мин — 9 % ($p < 0,001$) и на 40 мин — на 7 % ($p < 0,05$) по сравнению с интактными. Наблюдается четкая линейная зависимость эффекта обзидана от времени его действия. Таким образом, 20Е уменьшает активацию САС, вызванную ФГ. Сохранение линейной зависимости эффекта обзидана, очевидно, свидетельствует о нормализации состояния адренорецепторов при действии 20Е на фоне ФГ-анемии.

При ФГ-анемии общее количество лейкоцитов повышено, но доля лимфоцитов при этом снижается. Ранее показано (Утешев и др., 20000), что ФГ негативно влияет на активность мононуклеаров крови, снижая тем самым иммунологическую реактивность организма лабораторных животных. При действии 20Е на фоне ФГ-анемии количество лимфоцитов и нейтрофилов в крови самцов крыс было приближено к уровню их у интактных животных, у самок отмечалась тенденция к повышению уровня лимфоцитов. Фагоцитарная активность нейтрофилов и моноцитов достоверно повышена. Известно, что нейтрофилы крови, осуществляя процесс фагоцитоза, являются одним из первых защитных барьеров на пути проникновения в организм различных патологических факторов, например ФГ. По-видимому, действие 20Е направлено на развитие неспецифической сопротивляемости организма к их действию. Кроме этого обнаружено, что 20Е на фоне ФГ у самок крыс заметно повышает не только число активных фагоцитирующих клеток, но и сумму поглощенных чужеродных клеток, что может говорить о способности этого препарата эффективно выводить организм из патологического состояния. Увеличение фагоцитирующих лейкоцитов, как правило, обуславливает благоприятный исход заболевания. Полагаем, что в сложившейся сейчас в стране и мире неблагоприятной экологической обстановке, где большинство заболеваний связано с нарушением иммунного статуса, 20Е как один из представителей растительных экидистероидов может быть применен в качестве пищевой добавки для укрепления и поддержания иммунной системы организма.

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы:

1. С течением времени через 2 и 24 ч после однократного введения 20-гидроксиэкидизона на показатели крови эффект усиливается: повышаются количественные и качественные характеристики красной и бе-

лой крови, улучшаются физико-химические свойства мембраны эритроцитов, что свидетельствует о повышении способности крови выполнять свои функции: газотранспортную, гомеостатическую, защитную.

2. Длительное воздействие 20-гидроксиэкдизона в малой дозе более эффективно в отношении состояния симпато-адреналовой системы и адренореактивности эритроцитов, чем однократное воздействие. При длительном воздействии увеличивается стресс-резистентность организма, его резервные возможности в мобилизации механизмов адаптации.

3. Однократное кратковременное (2 ч) действие 20-гидроксиэкдизона и физиологического раствора (0,9 % NaCl) приводят к значительной активации неспецифических клеточных механизмов защиты с увеличением общего количества лейкоцитов в крови, нейтрофилов и снижением процентного содержания эозинофилов и агранулоцитов. Длительное введение 0,9 % NaCl приводит к снижению защитных механизмов, а 20-гидроксиэкдизона — к активации защитных механизмов длительного действия с сохранением высокого иммунологического статуса.

4. 20-гидроксиэкдизон облегчает выход животного из гемолитической анемии, «нормализует» показатели белой и красной крови, а также состояние симпато-адреналовой системы, проявляя, таким образом, высокие адаптогенные свойства.

* * *

1. Физиология человека: Курс лекций: В 2 кн. / Н.А. Агаджанян, Л.З. Тель, В.И. Циркин, С.А. Чеснокова. Алма-Ата: Казахстан, 1992. Т. 2. С. 352.
2. Володин В.В., Володина С.О. Способ получения экдистероидов. Пат. 2153346. Россия. МКИ³ А61К35/78. Заявл. 29.03.1999, № 99106351/14 // БИ. 2000. 27.07. № 21.
3. Голенда И.Л., Голенда А.М., Галеев А.Р. Кинетический способ исследования адренорецепторов в эритроцитах // Физиология человека. 1994. Т. 20. № 3. С. 151-154.
4. Заварзин А.А., Харазова А.Д., Молитвин Н.Н. Биология клетки. Общая цитология. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 1992. 320 с.
5. Зеленина Н.В., Андреева Л.И., Горанчук В.В. Действие непродолжительного умеренного нагревания организма человека на периферические лимфоциты // Цитология. 2000. Т. 42. № 2. С. 166-169.
6. Катюхин Л.Н. Реологические свойства эритроцитов. Современные методы исследования // Физиологический журнал им И.М. Сеченова. 1995. № 6. С. 122-129.
7. Манухин Б.Н., Нестерова Л.А., Смурова Е.А. Характеристика кинетики взаимодействия I-адренорецепторов эритроцитов крыс со специфическим блокатором пропранололом // Биол. мембраны. 1994. Т. 11. № 7. С. 489-493.
8. Мойсеенко Н.А., Иржак Л.И. Агглютинация Эр кролика при напряженном эритропозе // Общая биология. 1972. Т. 33. № 6. С. 779-786.

9. Молчанова Т.П. Основы молекулярной организации белков мембраны эритроцита и их дефекты, приводящие к гемолитическим анемиям // Гематология и трансфузиология 1989. № 7. С. 32-41.
10. Новгородцева Т.П., Эндакова Э.А., Иванова И.А. Возрастные и половые особенности фосфолипидного состава эритроцитов крыс линии Вистар в процессе постнатального онтогенеза // Российск. физиол. журнал им. И.М. Сеченова. 2002. № 1. С. 53-62.
11. Петрова Н.Б., Канева А.М. Исследование адренорецепторов в эритроцитах человека и кошки методом кислотного гемолиза // Кислотно-основной гомеостаз: физиология, биохимия и клиника. Сыктывкар, 1997. С. 122-127.
12. Адренореактивность эритроцитов человека и животных при различных воздействиях / Н.Б. Петрова, И.В. Рау, А.М. Канева, Е.В. Изъюрова // Тез. докл. III Всерос. межд. симп. «Физиологические механизмы природных адаптаций». Иваново, 1999. С. 58-60.
13. Рубина Х.М. Биохимия эритроцитов. Л.: Наука, 1985. 360 с.
14. Середенко М.М., Дударев В.П., Лановенко И.И. Механизмы развития гемической гипоксии. Киев: Наука, 1987. 200 с.
15. Стародуб Н.Ф. Изучение свойств фракций гемоглобина крыс // Биохимия. 1974. Т. 39. № 4. С. 757-761.
16. Влияние экдистерона на биосинтез белков и нуклеиновых кислот в органах мышей / И.Н. Тодоров, Ю.И. Митрохин, О.И. Ефремова, Л.И. Сидоренко // Химико-фарм. журнал. 2000. Т. 34. № 9. С. 3-5.
17. Тодоров И. Клинические лабораторные исследования в педиатрии. София: Медицина и физкультура, 1968. 874 с.
18. Туганова А.В., Коцюрба А.В. Взаимодействие *in vitro* C₂₇-стеролов и мембран эритроцитов, зависящее от структуры стерола и его концентрации // Cell. Molecular Biol. Letters. 1996/ Vol. 1. hh. 129-135.
19. Биотехнологические направления в создании лекарств и диагностических препаратов липидной природы / В.И. Швец, Ю.М. Краснопольский, А.П. Каплун, А.Е. Степанов // Вопр. мед. химии. 1997. Т. 43. Вып. 5. С. 416-423.
20. Шиффман Ф.Дж. Патофизиология крови. М.; СПб.: БИНОМ-Невский Диалект, 2000. 451 с.
21. Ужанский Я.Г. Физиологические механизмы регенерации крови. М., 1968. 264 с.
22. Щерба Р.Н. и др. Физиология эритрона // Руководство по физиологии: Кровь. М.: Наука, 1978. С. 126-185.
23. Ямайкина И.В., Фурманчук Д.А. Перекрестный метод анализа скорости оседания и коэффициента агрегации эритроцитов в медицинской диагностике // Гематол. и трансфузиол. 1999. № 3. С. 39-41.

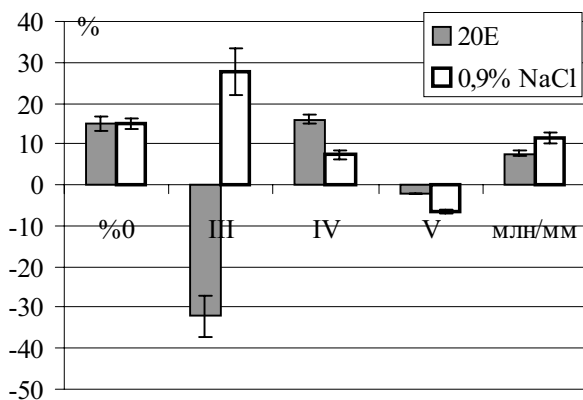


Рис. 1. Изменение концентрации Rt и распределения их по стадиям зрелости в крови крыс-самцов через 2 ч после введения растворов.

По оси ординат — изменение параметров красной крови в процентах к интактной группе, принятой за 100%

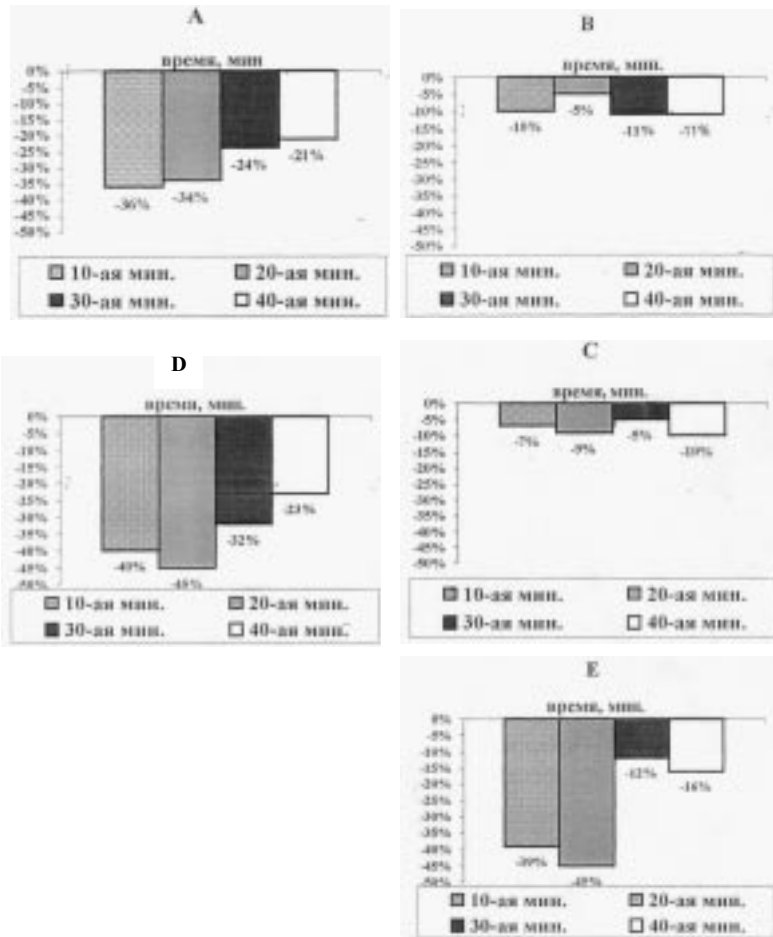


Рис. 2. Выраженность эффекта обзидана в опытных пробах исследуемых групп самцов (за исходный уровень принята РАЭ в контрольной пробе).

А — интактная группа.

В — физиологический раствор — многократное действие (5 дней).

С — физиологический раствор — однократное действие (2 ч).

Д — экдизон — многократное действие.

Е — экдизон — однократное действие

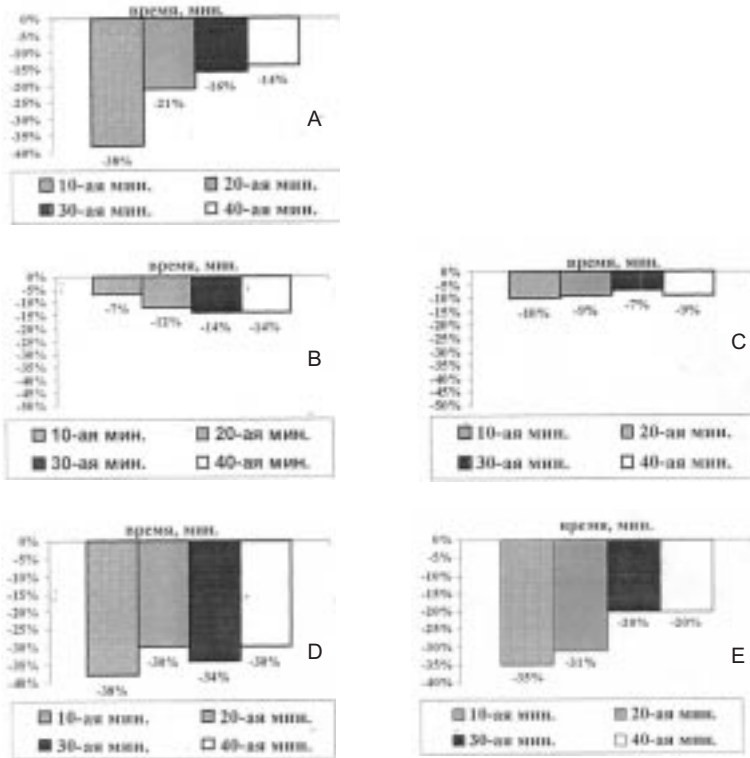


Рис. 3. Выраженность эффекта обзидана в опытных пробах исследуемых групп самок (за исходный уровень принята РАЭ в контрольной пробе)

- A — интактная группа.
- B — физиологический раствор — многократное действие (5 дней).
- C — физиологический раствор — однократное действие (2 ч).
- D — экдизон — многократное действие.
- E — экдизон — однократное действие

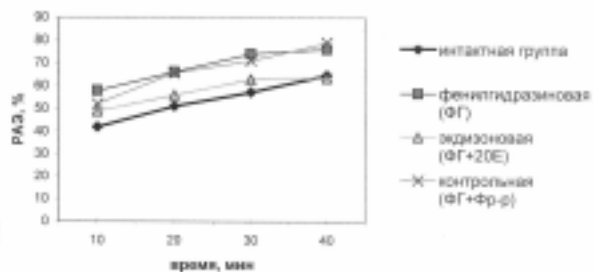
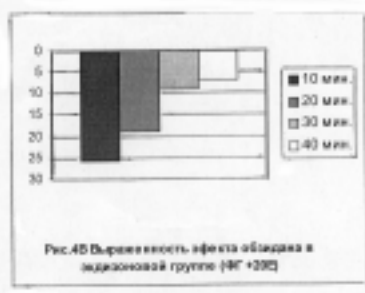
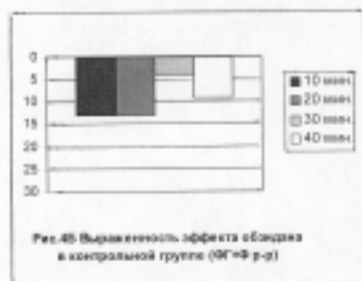


Рис. 5 Степень РАЗ крови без добавления обидана

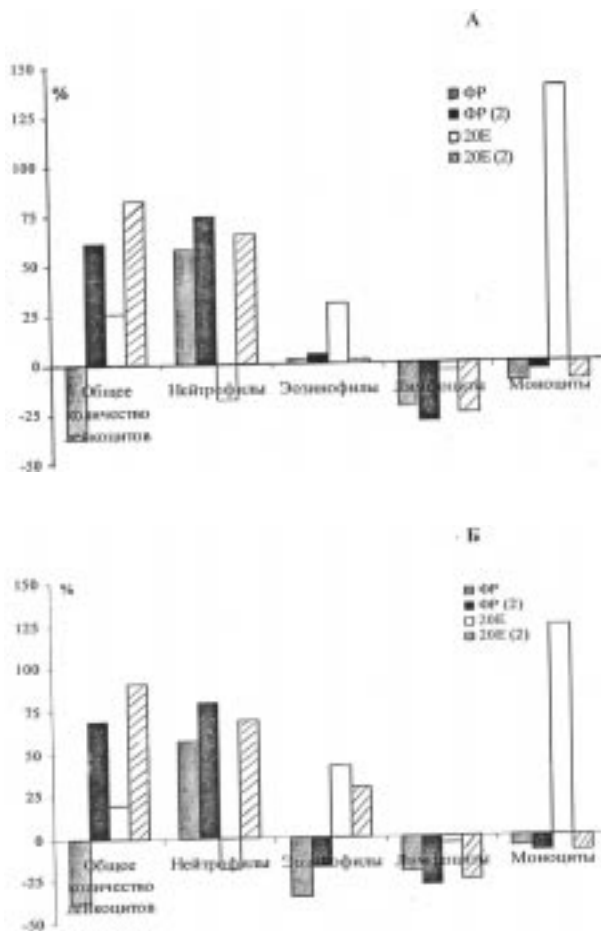


Рис. 6. Изменение количественных характеристик лейкоцитов крыс (А - самок, Б - самцов) при однократном (2 ч) и многократном введении 20-гидроксиэкидизона и физиологического раствора (за исходный уровень приняты значения интактных животных, соответствующие 100%)

ФАКТЫ, СОБЫТИЯ, ЛЮДИ

Ирина Вадимовна Пийр (к 50-летию со дня рождения)



Ирине Вадимовне Пийр — педагогу и ученому, известному своими исследованиями в области химии твердого тела, — исполнилось 50 лет.

И.В. Пийр родилась 21 апреля 1955 г. в г. Талдом Московской области в семье работников сельского хозяйства Вадима Павловича и Лидии Ивановны Пийр, которые после окончания вуза по распределению приехали в г. Сыктывкар. По окончании средней школы в 1972 г. И.В. - Пийр поступила на I курс химического отделения Сыктывкарского государственного университета. После успешной сдачи государственных экзаменов и защиты дипломной работы в 1977 г., получив диплом с отличием, была рекомендована для работы на кафедре химии СыктГУ. Проработав целый учебный год на кафедре химии в должности ассистента, И.В. Пийр поступила в аспирантуру химического факультета Ленинградского государственного университета. После завершения аспирантуры в 1983 г. защитила кандидатскую диссертацию в области магнетохимии твердых растворов оксидов 4d — переходных металлов.

Вернувшись на кафедру химии, И.В. Пийр прошла все ступени преподавательской работы от ассистента, старшего преподавателя до доцента, получив звание доцента кафедры химии. Ирина Вадимовна владеет спецификой университетского преподавания, которое предполагает

интенсивную и органическую связь учебно-методической и научно-исследовательской работы.

По-прежнему центральной темой научного творчества И.В. Пийр осталась химия твердого тела, являющаяся важнейшим направлением в неорганической химии: разработка основ создания веществ и материалов с заданными физическими и физико-химическими свойствами. Изучение кристаллической структуры и магнитного поведения твердых растворов сложных ниобатов висмута, выполняющих роль диамагнитных растворителей — $\text{Bi}_2\text{BaNb}_2\text{O}_9$; $\text{Bi}_2\text{MgNb}_2\text{O}_9$; $\text{Bi}_2\text{ZnNb}_2\text{O}_9$.

С 1998 г. исполняла обязанности декана, а в 1999 г. И.В. Пийр была избрана деканом химико-биологического факультета. В этой должности работает до настоящего времени.

Большую работу И.В. Пийр проводит по укреплению творческого сотрудничества между институтами химии, биологии и геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН и кафедрами химико-биологического факультета Сыктывкарского государственного университета.

Интеграционная работа имеет несколько направлений: совместная подготовка специалистов; выполнение совместных фундаментальных и прикладных научных исследований; проведение совместных природоохранных исследований и мероприятий экологического образования и воспитания населения РК.

Педагог и ученый Ирина Вадимовна Пийр отметила свой 50-й день рождения. Ее ученики, студенты, преподаватели и сотрудники факультета желают Ирине Вадимовне доброго здоровья, твердости духа, свершения задуманных дел и всегда рады видеть ее на кафедре и факультете.

Б.Я. Брач

Ольга Александровна Залевская
(к 50-летию со дня рождения)



В апреле 2005 г. доцент кафедры органической химии Залевская Ольга Александровна отметила свой золотой юбилей.

О.А. Залевская родилась в г.Сыктывкаре в 1955 г. В 1972 г. после окончания средней школы поступила на I курс Сыктывкарского государственного университета по специальности «Химия». В 1977 г. в числе первых выпускников окончила с отличием СыктГУ, в том же году начала работать на кафедре органической химии в качестве лаборанта. В 1981 г. поступила в аспирантуру Московского государственного университета и в 1985 г. успешно защитила кандидатскую диссертацию. После окончания аспирантуры МГУ О.А. Залевская вернулась

на кафедру органической химии и работала старшим научным сотрудником, занималась научными разработками в области антикоррозионных покрытий для авиационной промышленности. В сотрудничестве с научным сотрудником кафедры В.В. Пунеговым работа по данному направлению была доведена до стадии полупромышленного внедрения.

В должности доцента кафедры работает с 1994 г. В 1998 г. ей присуждено звание доцента кафедры биоорганической химии и ВМС. С 2002 г. является зам. зав. кафедрой органической химии, возглавляемой директором Института химии КНЦ УрО РАН член-корр. РАН А.В. Кучиным.

О.А. Залевская является ведущим преподавателем кафедры. С 2001 г. она читает лекции по курсу «Органическая химия» (для студентов по специальности «Химия»). Кроме этого ею разработаны и реализованы следующие курсы: «Органическая химия и ВМС» (специальность «Биология»), спецкурсы: «Органический синтез», «Стереохимия», «Теоретические основы органической химии».

О.А. Залевская читает лекции, проводит семинары, лабораторные занятия, руководит курсовыми и дипломными работами, учебной и производственной практикой студентов. Уровень занятий, проводимых О.А. Залевской, оценивается как соответствующий современным научным и методическим требованиям. Постоянно совершенствует содержание и методику преподавания.

О.А. Залевская ведет большую организационно-методическую работу. Она принимает активное участие в подготовке и переподготовке учителей химии для Республики Коми, а также в целевой подготовке специ-

алистов для академических институтов. В 2000 г. О.А. Залевская принимала активное участие в организации учебно-научного центра «Физико-химическая биология», созданного для координации научных работ и подготовки специалистов в области химии природных соединений. Этот центр под руководством директора Института физиологии академика Ю.С. Оводова объединил усилия ведущих специалистов научных институтов КНЦ УрО РАН и преподавателей вузов (Сыктывкарского госуниверситета и Лесного института). О.А. Залевская является зам. руководителя центра по учебной работе. Во многом благодаря инициативе и энергии О.А. Залевской учебно-научный центр успешно работает в течение последних 5 лет: разработаны учебные планы и новые спецкурсы, подготовлены два десятка квалифицированных специалистов.

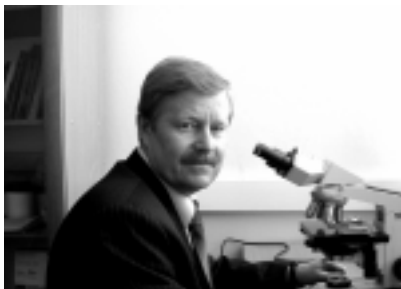
О.А. Залевская активно участвует в решении вопросов общефакультетского уровня. В течение 7 лет она является членом Ученого совета химико-биологического факультета.

О.А. Залевская ведет активную научно-исследовательскую работу. Является автором более 30 научных публикаций и 10 учебно-методических работ. С 2002 г. возглавляет новый раздел по госбюджетной теме кафедры «Синтез биологически активных веществ на основе возобновляемого растительного сырья». Является руководителем проекта «Хиральные комплексы палладия», представленного на конкурс научных работ РФФИ в 2005 г. Научная работа ведется в тесном сотрудничестве с сотрудниками лаборатории лесохимии КНЦ УрО РАН. В 2002-2003 гг. принимала участие в финансируемом проекте «Интеграция науки и высшего образования России 2002-08 гг.».

О.А. Залевская постоянно совершенствует свою научную и методическую квалификацию. В 2002 г. прошла 4-месячную стажировку в университете г. Валдоста (США) с практикой преподавания курса «Органическая химия» на английском языке. Ежегодно она выезжает в научные командировки, поддерживает сотрудничество со специалистами химического факультета МГУ. О.А. Залевская является высококвалифицированным специалистом.

А.В. Кучин

Геннадий Николаевич Доровских



(к 50-летию со дня рождения)

28 апреля 2005 г. отметил свой 50-летний юбилей профессор кафедры зоологии, д-р биол. наук Геннадий Николаевич Доровских.

После окончания школы Геннадий Николаевич учился в ветеринарном техникуме, а затем поступил в Сыктывкарский государственный университет. Он отлично занимался, отличался усидчивостью и упорством. Еще в студенческие годы Геннадий Николаевич проявил огромный интерес к паразитологическим исследованиям. Тема его дипломной работы: «Дифиллоботрииды, развивающиеся в лососевых рыбах нижнего течения р. Печоры».

В 1985 г. Г.Н. Доровских поступил в аспирантуру Зоологического института АН СССР, где его научным руководителем становится профессор А.В. Гусев. Геннадий Николаевич всегда с большой теплотой и уважением отзывается об Александре Владимировиче и гордится, что имел возможность учиться у всемирно известного паразитолога и замечательного человека. Кандидатскую диссертацию на тему «Фауна, экология и география паразитов рыб бассейна среднего течения р. Вычегды» он успешно защитил в 1988 г. В дальнейшем Геннадием Николаевичем была изучена ихтиопаразитофауна обширнейшей территории Европейского Северо-Востока России. Это позволило ему развить новое направление исследований — изучение вопросов структуры и функционирования паразитарных систем, использования паразитофауны для оценки состояния гидробиоценозов. В 2003 г. Г.Н. Доровских защитил докторскую диссертацию на тему «Паразиты пресноводных рыб Северо-Востока Европейской части России». Геннадий Николаевич Доровских имеет 118 научных публикаций.

Г.Н. Доровских является членом-организатором Центрального совета Российского паразитологического общества, принимает участие в

многочисленных конференциях и симпозиумах по паразитологии и экологии.

С 1981 г. Геннадий Николаевич преподает на кафедре зоологии химико-биологического факультета СыктГУ. В течение многих лет Г.Н. Доровских возглавляет отдел научно-исследовательской работы Сыктывкарского госуниверситета и успешно совмещает преподавательскую и научную деятельность.

При активном участии Геннадия Николаевича в 2003 г. была создана учебно-научная лаборатория биологии водных организмов. Благодаря его энергии и трудолюбию лаборатория оснащена прекрасным оборудованием, организуются и проводятся экспедиции.

За время работы Г.Н. Доровских внесен значительный вклад в подготовку специалистов-биологов. При его непосредственном участии был организован и долгое время работал на базе средней школы № 25 г. Сыктывкара специализированный биологический класс. В числе выпускников класса доктор и несколько кандидатов биологических наук. На разных кафедрах университета им читаются такие общие дисциплины, как «Биология размножения и развития» и «Зоопсихология». Геннадий Николаевич руководит научной работой аспирантов, курсовыми и дипломными работами студентов.

Друзья и коллеги искренне желают Геннадию Николаевичу крепкого здоровья, успехов во всех начинаниях, энергии, жизнелюбия и оптимизма.

М.М. Долгин

ИНФОРМАЦИИ

О создании и деятельности Коми республиканского отделения Всероссийского общества охраны природы

29 ноября 2004 г. Всероссийскому обществу охраны природы исполнилось 80 лет. Деятельность этого Общества всегда была подчинена вовлечению масс в активное участие в охране природы России, широчайшей пропаганде знаний о природе, воспитанию у растущего поколения бережного отношения к природе, формированию и приобретению положительного опыта в отношении планеты Земля.

История создания, этапы Всероссийского общества охраны природы тесно были связаны с региональным общественным природоохранным движением, в том числе и в Республике Коми.

И зародилось это движение не на пустом месте. В научной и краеведческой литературе много рассказывается о способах традиционного природопользования коренными жителями с древнейших времен до периода Октябрьской революции, об охоте, рыбной ловле, о любви к природе во имя будущего, во имя сохранения природной среды.

Со временем и особенно после революции Коми край с богатыми водными источниками, лесом, запасами полезных ископаемых все интенсивнее подвергался агрессии на природу со стороны человека. Это требовало дополнительных, четко продуманных мероприятий, связанных с охраной водной и воздушной среды от загрязнения, работой по повышению плодородия земель, улучшением эксплуатации лесных богатств и полезных ископаемых.

Коми республиканское отделение ВООП организовано оформилось в 1962 г. Оно насчитывало тогда всего 5 тысяч индивидуальных и 105 коллективных членов.

Коми республиканское отделение, активно вовлекая широкие массы в природоохранное движение, достигло огромных успехов, но общественно-политическая ситуация в стране, изменившаяся в 1986 г., не способствовала успешной работе Всероссийского общества охраны природы.

К тому периоду существенно ослабло руководство Коми республиканского отделения ВООП, не происходили своевременные перевыборы районных, городских организаций, постепенно они теряли свои полномочия. Несмотря на то, что определенная часть населения на местах пыталась что-то делать, природоохранные органы перестали обращать

внимание и на эти положительные явления, поэтому на X съезде ВООП 10-11 декабря 1996 г. шел обстоятельный разговор о работе Общества и его организаций в современных условиях, в котором приоритетным стало экологическое воспитание и образование. На съезде было отмечено, что ряд областных и республиканских отделений ВООП прекратили свою работу.

Центральный совет Всероссийского общества охраны природы поставил задачу сохранения, а в нашем, региональном, случае — воссоздания Коми отделения ВООП.

24 апреля 1997 г. состоялась Коми республиканская конференция по воссозданию Коми отделения Общества. К тому времени наше отделение практически прекратило свое существование. На конференции был выбран совет, в состав которого вошел 41 человек, а также президиум из 11 человек.

Воссоздание — дело непростое, все надо было практически начинать сначала: добиться выделения помещения для повседневной работы, установить телефон, приобрести мебель, получить какие-то материальные льготы и многое другое. Надо было начать формирование библиотечки по экологическим вопросам, привести в порядок и изучить имеющийся за прошлые годы архив.

Параллельно с этим велась организационная работа по воссозданию районных, студенческих, коллективных организаций Общества. Районные комитеты по охране природы отлично понимали, что без общественников им не решить многих задач по охране природы.

Республика Коми — одна из самых богатых лесосырьевых регионов Северо-Запада РФ. На сегодня существует Программа развития лесного комплекса Республики Коми, но пока выполнение ее связано лишь с использованием лесных богатств, а о воссоздании лесов, мониторинге лесоиспользования речи нет. Это в перспективе: нужны соответствующие инвестиции. С целью лесовосстановления ведутся рубки ухода, в том числе на территории заказников (Белоборский комплексный — под Сыктывкарком). Европейцев — это страны Баренц-Евро-Арктического региона (в 2002 г. Республика Коми — 13-й полноправный член этого международного содружества) — манят девственные леса Коми. Поэтому в 2005 г. в Сыктывкаре планируется проведение Международного экологического форума стран БЕАР на основании опыта использования таежных лесов по программе «Модельный лес «Прилузье». Эта программа получила высокую оценку со стороны «Гринпис России».

Всероссийское общество охраны природы является примером участия людей в экологической деятельности, через которую формируется осознанное стремление лично способствовать сохранению окружающей среды путем разумных действий.

Нам предстоит еще много сделать по проблемам устойчивого развития и экологизации общественного сознания.

С учетом остроты проблем экологической безопасности населения возрастает значение экологической информации, просвещения, образования и воспитания.

Все это должно стать обязанностью и государства, и общественности. Ответственность каждого человека, его активная позиция в решении проблем достижения устойчивого развития Республики Коми — вот та великая и благородная цель, к которой мы должны стремиться.

*Б.Я. Брач**

* Брач Борис Янович — Председатель Коми республиканского совета Всероссийского общества охраны природы, доктор, профессор, заслуженный деятель науки РК и Российской Федерации.

Сведения об авторах

Акулова Любовь Ивановна — доцент кафедры анатомии и физиологии человека и животных КГПИ, канд. биол. наук.

Антонец Игорь Викторович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиофизики и электроники СыктГУ.

Белых Дмитрий Владимирович — канд. хим. наук, с.н.с. ИХ КНЦ УрО РАН.

Брач Борис Янович — д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой неорганической и аналитической химии.

Власов Владимир Сергеевич — ст. преподаватель кафедры радиофизики и электроники СыктГУ.

Гольчевский Юрий Валентинович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиофизики и электроники СыктГУ.

Долгин Модест Михайлович — зав. кафедрой зоологии СыктГУ, д-р биол. наук, профессор.

Доровских Геннадий Николаевич — д-р биол. наук, проректор по научной работе СыктГУ.

Жук Надежда Алексеевна — ассистент кафедры неорганической и аналитической химии.

Залевская Ольга Александровна — канд. хим. наук, доцент кафедры органической химии.

Калинин Юрий Егорович — д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедры физики твердого тела Воронежского ГТУ.

Кодесс Михаил Исаакович — канд. хим. наук, с.н.с. Института органического синтеза УрО РАН.

Конева Ольга Николаевна — студентка СыктГУ химико-биологического факультета.

Котов Леонид Нафанаилович — д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой радиофизики и электроники СыктГУ.

Кучин Александр Васильевич — д-р хим. наук, профессор, директор ИХ КНЦ УрО РАН, член-корреспондент РАН.

Мойсеенко Нелли Алексеевна — канд. биол. наук, доцент, зав. кафедрой физиология человека и животных.

Некипелов Сергей Вячеславович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики твердого тела СыктГУ.

Низовцев Андрей Николаевич — н.с. Института биологии КНЦ УрО РАН.

Носов Леонид Сергеевич — аспирант, ассистент кафедры радиофизики и электроники СыктГУ.

Петрова Наталья Борисовна — канд. биол. наук, доцент.

Петрунёв Сергей Николаевич — аспирант кафедры радиофизики и электроники СыктГУ.

Пиёр Ирина Вадимовна — канд. хим. наук, доцент, декан химико-биологического факультета.

Селькова Ирина Александровна — студентка СыктГУ химико-биологического факультета.

Сивков Виктор Николаевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, декан физического факультета.

Ситников Александр Владимирович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник кафедры физики твердого тела Воронежского ГТУ.

Сметанин Александр Иольевич — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры информатики и вычислительной техники КГПИ.

Степанов Владимир Григорьевич — зав. биостанцией СыктГУ.

Таскаева Анастасия Анатольевна — канд. биол. наук, м.н.с. лаборатории экологии наземных и почвенных беспозвоночных Института биологии КНЦ УрО РАН.

Тулаева Людмила Анатольевна — ст. препод., кафедры органической химии.

Уляшев Анатолий Михайлович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиофизики и электроники СыктГУ, зам. декана физического факультета СыктГУ.