

ГИГАНТСКИЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ ДОМЕНЫ В ПЕРЕМЕННОМ ПОЛЕ С АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫМ ГРАДИЕНТОМ

© Г.С.Кандаурова, А.Э.Свидерский

Уральский государственный университет,
620083 Екатеринбург, Россия
(Поступила в Редакцию 28 апреля 1995 г.
В окончательной редакции 13 ноября 1995 г.)

Впервые в пленках ферритов-гранатов в переменном магнитном поле наблюдались вращающиеся вихри из гигантских динамических доменов с гребенчатой формой границ. Определена амплитудно-частотная область, в которой реализуется указанный эффект, а для его объяснения приведена качественная модель.

В [1,2] в пленках ферритов-гранатов в переменном магнитном поле впервые наблюдались гигантские динамические домены (ДД). Характерные размеры этих ДД (ширина полосовых, диаметр цилиндрических, диаметр и ширина кольцевых ДД) на 1–2 порядка и более превышают ширину доменов в исходной лабиринтарной доменной структуре. Гигантские ДД образуются в переменном поле, амплитуда которого больше статического поля насыщения. В данной работе исследуются гигантские ДД нового вида [3], которые формируются в аксиально-симметричном переменном магнитном поле. Наблюдалось необычное поведение этих доменов.

Проиллюстрируем экспериментальные результаты на примере эпитаксиальной пленки (Ш) феррита-граната $(\text{YBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ с перпендикулярной анизотропией. Толщина пленки $L = 8.5 \mu\text{m}$, намагниченность насыщения $M_s = 8.5 \text{ G}$, поле насыщения H_s , которое определялось по коллапсу цилиндрических магнитных доменов, равно 31 Oe . Ширина доменов в исходной лабиринтарной доменной структуре киттельевского типа $d_0 = 15.5 \mu\text{m}$. Доменная структура выявлялась с помощью магнитооптического эффекта Фарадея. Переменное магнитное поле создавалось катушкой с внутренним диаметром 6 и высотой 4 mm. Во всех ранее опубликованных наших работах (см., например, [4,5]), посвященных исследованию динамических доменных структур (ДДС) и ангерного состояния феррит-гранатовых пленок, образцы помещались в центре катушки. Таким образом, на пленки действовало пространственно однородное переменное поле.

В данной работе образец помещался на торец катушки. В такой геометрии опыта на образец действуют и нормальная, и радиальная

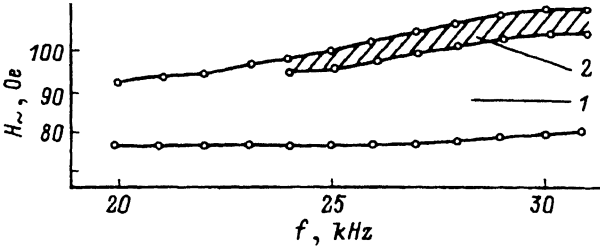


Рис. 1. Область существования гигантских ДДС в переменном магнитном поле с аксиально-симметричным градиентом.

Область 1 — неупорядоченная ДДС, область 2 — упорядоченная ДДС.

составляющие переменного магнитного поля $H_{\sim} = H_0 \sin 2\pi ft$. Кроме переменного поля на образец могло накладываться постоянное однородное магнитное поле смещения H_b , направленное по нормали, т.е. вдоль оси легкого намагничивания пленки (более полное описание методики см. в [4]). Как показал опыт, в определенном интервале H_0 и f (область 1 на рис. 1) формируются стабильные, сильно контрастные ДД. Время жизни их настолько велико, что они легко наблюдаются визуально. В очень узкой амплитудно-частотной области 2 на рис. 1 ДДС становится более или менее упорядоченной, ДД по форме отражают аксиально-симметричную геометрию опыта.

Для примера на рис. 2 показана такая ДДС при $f = 25$ kHz и изменении амплитуды поля H_0 от 94 до 100 Oe. Она состоит из внешнего кольцевого домена и внутренних кольцевых сегментов. Эта гигантская ДДС с периодом ≈ 0.35 mm, что больше чем на порядок превышает $2d_0$.

С увеличением H_0 ДДС на рис. 2,а сжимается до размера ≈ 1 mm и трансформируется в систему двух концентрических кольцевых доменов (рис. 2,д) с «черным» цилиндрическим доменом (ЦД) в центре. При увеличении поля до $H_0 = 100$ Oe ДДС еще сжимается, «черный» ЦД коллапсирует, и система приобретает вид вращающегося с частотой в несколько герц «веретена» с «белым» ЦД внутри (рис. 2,е). Небольшое увеличение H_0 вызывает коллапсирование внутреннего «белого» ЦД. «Черное» веретено (рис. 2,ф) продолжает вращаться с частотой того же порядка. Подчеркнем, что все описанные кардинальные изменения ДДС происходят в очень узком интервале изменения $\Delta H_0 \approx 3$ Oe и при наличии слабого поля смещения $H_b \approx 1$ Oe.

При увеличении H_b до 2–3 Oe можно получить другие гигантские ДД в виде вращающегося вихря, состоящего из одного (рис. 3,с) или нескольких «рукавов» (рис. 3,а, б). Меняя знак поля H_b , можно изменить направление намагниченности в «рукавах» и соответственно направление вращения вихря (на рис. 3,с — вращение по часовой стрелке, на рис. 3,а, б — против). Очень небольшое увеличение H_b вызывает распад вихря и образование системы гигантских динамических ЦД диаметром ≈ 0.5 mm (рис. 3,д). Эта ДДС состоит из центрального неподвижного ЦД и нескольких ЦД, вращающихся вокруг него. Как правило, вращающиеся ЦД несколько деформированы и похожи на эллиптические ЦД. Большие оси этих ЦД ориентированы к центру и по направлению вращения всей системы ЦД. Положение центрального ЦД, так же как и центра вихря, однозначно связано с осью симметрии катушки переменного магнитного поля.

Отметим некоторые важные моменты.

1) Все описанные гигантские ДДС состоят из доменов с сильно вытянутыми поперечными боковыми отростками. Таким образом, ДД имеют гребенчатую форму границ (рис. 4). Период гребенчатой

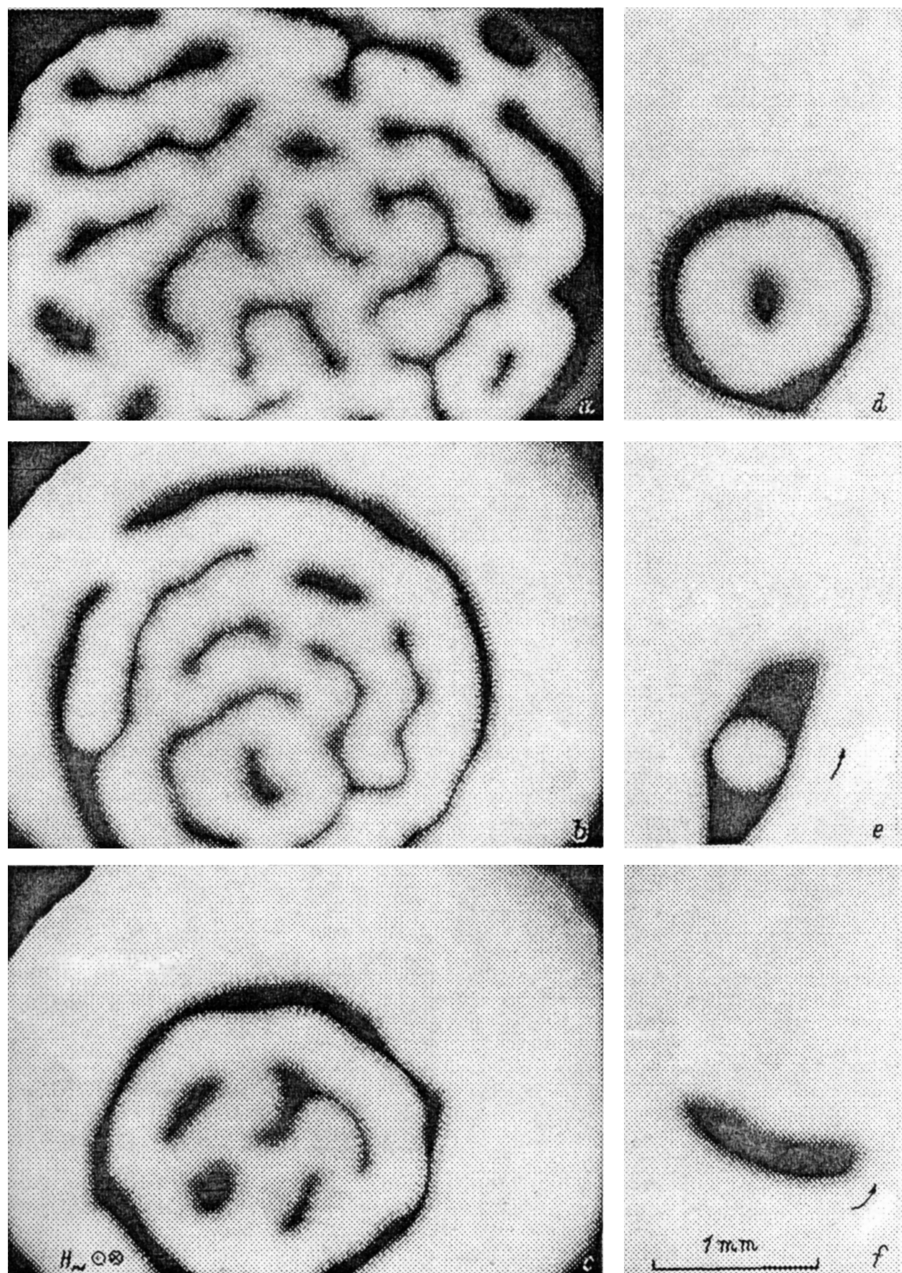


Рис. 2. Вид ДДС в переменном поле частотой 25 кГц и с различными амплитудами.

H_0 (Ое): *a* — 94.0, *b* — 97.8, *c* — 98.6, *d* — 99.0, *e* — 99.4, *f* — 99.7. Направление вращения доменов в случаях *e* и *f* указано стрелкой.

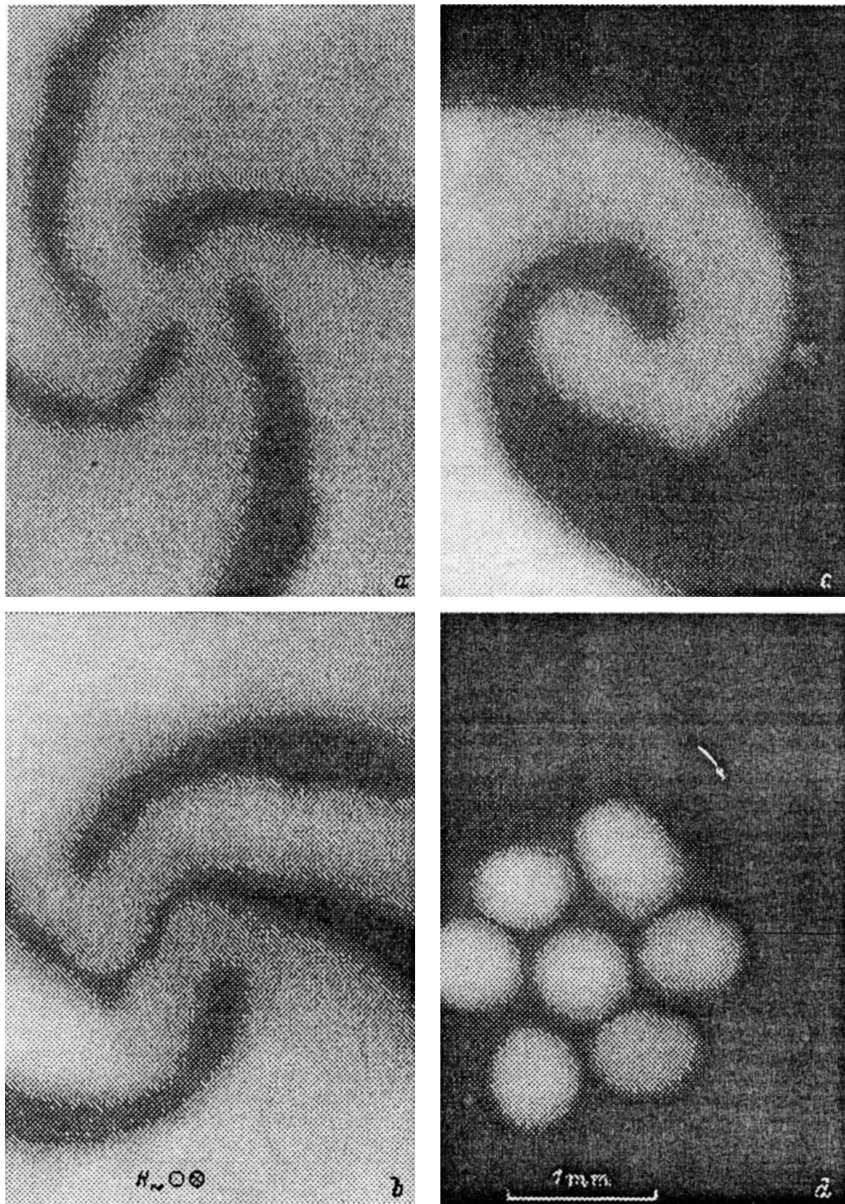


Рис. 3. Четырехрукавные (*a, b*), однорукавный (*c*) вихри и вращающиеся ПД (*d*), возникающие в переменном магнитном поле с аксиально-симметричным градиентом

структуры $\approx 35 \mu\text{m}$, т.е. практически равен периоду доменной структуры образца в исходном состоянии. На рис. 5 приведена схема, поясняющая изменение положения гребенчатой границы в зависимости от знака переменного магнитного поля в определенный момент времени. При нарастании поля по направлению «от нас» (рис. 5, *a*) магнитная фаза с соответствующим направлением намагниченности увели-

двигается за счет удлинения «зубьев» гребенки вправо и укорачивания отростков у доменов противоположной магнитной фазы до положения, обозначенного штриховыми линиями. При направлении поля «к нам» все происходит наоборот: гребенчатая граница смещается влево (рис. 5, *b*). Таким образом изменяется соотношение площадей (объемов) между двумя магнитными фазами при изменении направления и величины переменного магнитного поля. При этом в среднем за период относительный объем магнитных фаз остается неизменным.

При непосредственном наблюдении в микроскоп заметно, что боковые отростки («зубья» гребенки) непрерывно перемещаются вдоль контура домена. При изменении H_0 на 1–2 Ое удавалось наблюдать изменение направления перемещения отростков.

Гребенчатую структуру гигантских ДД мы наблюдали ранее [1,2] на других образцах и в несколько другой геометрии опыта. Это наводит на мысль о том, что при размерах доменов в ДДС, на порядок и более превышающих период статической доменной структуры, образование гребенчатых структур является общей закономерностью, обусловленной большими полями размагничивания на границах гигантских доменов.

2) Вращение вихрей (рис. 3, *a-c*), системы эллиптически искаженных ЦД (рис. 3, *d*) и веретенообразных ДД (рис. 2, *e, f*) можно связать с действием гиротропных сил [3,6,7]. Например, для «веретена» этот эффект пояснен схемами на рис. 6, *a, b*. Из-за асимметрии значений $(+H_0 + H_b)$ и $(-H_0 + H_b)$ и коэрцитивности доменных границ углы φ_1 и φ_2 за соответствующие полупериоды поля различны и $\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1) \neq 0$. При периодическом повторении процесса φ накапливается, что и приводит к вращению с некоторой частотой f_s . При наблюдаемой $f_s \approx 1$ Нз и $f = 25$ кНз угол поворота $\varphi \approx 0.01^\circ$. С изменением знака H_b знак φ меняется, и соответственно меняется направление вращения.

Образование вихреобразных ДДС (рис. 3, *a-c*) происходит, по-видимому, следующим образом. Поскольку пленка феррита-граната в данном эксперименте расположена не внутри, а снаружи катушки, то на нее кроме нормальной составляющей переменного магнитного поля действует также плоскостная составляющая, имеющая аксиальную симметрию. При этом напряженность магнитного поля в центре образца больше, чем на его краях. В силу этого образовавшиеся в пленке домены вытягиваются в радиальных направлениях. Как отмечалось выше, границы вихреобразных доменов имеют форму гребенки, состоящей из отростков полосовых доменов. На головки этих полосовых доменов действует гиротропная сила. Поскольку присутствует еще небольшое смещающее постоянное магнитное поле, то из-за нарушения симметрии переменного поля возникает результирующая сила, которая разворачивает домен так, как показано на рис. 7. Кроме того, на домен действует сила F , обусловленная градиентом магнитно-

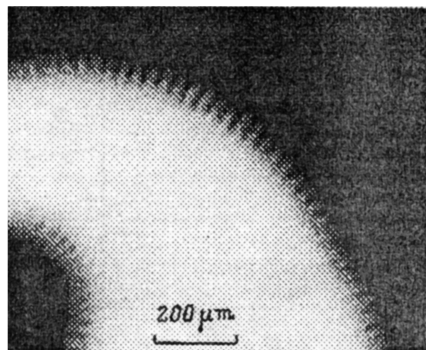


Рис. 4. Гребенчатая доменная граница гигантских ДД.

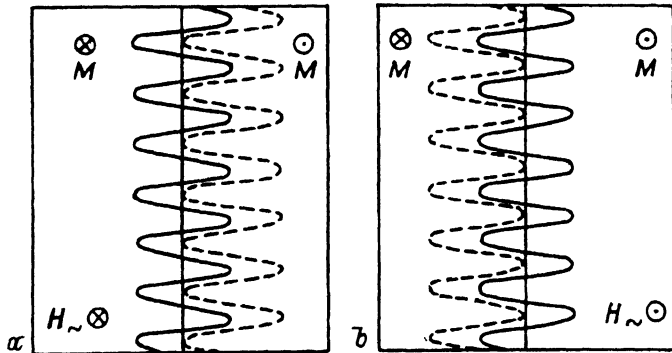


Рис. 5. Схема, поясняющая изменение положения гребенчатой границы в зависимости от знака переменного магнитного поля в определенный момент времени.

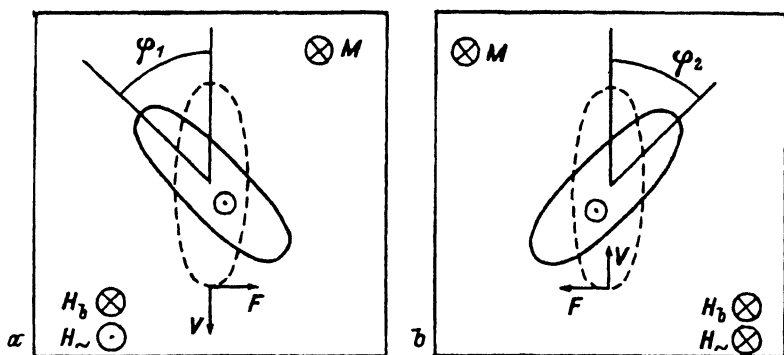


Рис. 6. Схема, поясняющая эффект вращения веретенообразных ДД.

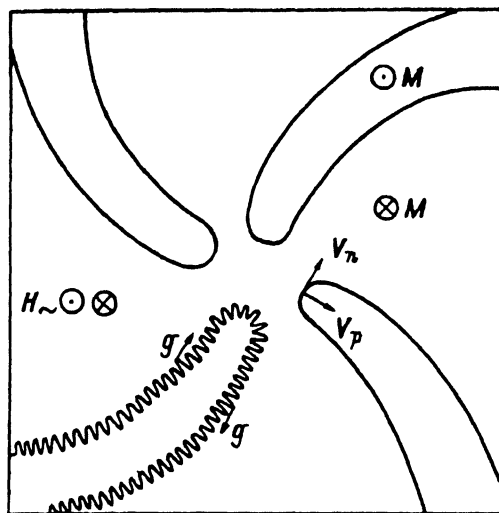


Рис. 7. Схема, поясняющая вращение вихреобразных ДД.

g — гиротропная сила, действующая на головки полосовых доменов, V_n и V_p — компоненты скорости домена, возникающие под действием силы, обусловленной радиальным градиентом магнитного поля.

го поля [6], и у него проявляются компоненты скорости, параллельные и перпендикулярные градиенту, которые и придают домене поступательное движение. Вследствие указанных причин домены закручиваются, образуя структуру, напоминающую по форме вихрь.

Вероятно, нельзя исключать из рассмотрения и возможную связь наблюдаемых эффектов с существованием вертикальных блоховских линий (ВБЛ) в стенках ДД и наличием аксиально-симметричного градиента поля H_z . Если верхушки «веретена» или «зубьев» гребенки уподобить жестким ЦМД, содержащим ВБЛ, то будет видна аналогия в поведении ДДС с поведением жестких ЦМД в градиентном статическом поле [6] или гантелевидных доменов в импульсных полях [7].

Описываемые вихреобразные домены отличаются от магнитных вихрей, наблюдаемых ранее в [8]. Отличие состоит прежде всего в том, что в [8] динамические вихри создавались с помощью одиночных импульсов магнитного поля с амплитудой, большей или по крайней мере сравнимой с величиной поля одноосной анизотропии образца, и в присутствии постоянного поля смещения $H_b > H_s$. Время нарастания импульса измерялось наносекундами. Возникновение вихрей в таком случае связано с вращением намагниченности и с зарождением магнитных доменов обратной фазы. При этом, как указывают авторы, механизм зарождения вихрей спин-волновой.

В нашем случае на образец непрерывно действует переменное магнитное поле, амплитуда которого намного меньше поля анизотропии. Это значит, что процесс вращения намагниченности в объеме образца под действием магнитного поля не должен играть существенной роли. При этом характерные времена (как время нарастания поля (десятки микросекунд), так и время существования вихрей (секунды)) на несколько порядков больше аналогичных характеристик в [8]. Общим для тех и других вихреобразных структур является механизм закручивания рукавов вихря, связанный с действием гиротропной силы в присутствии аксиально-симметричного неоднородного магнитного поля.

3) При частотах f и амплитудах H_0 , соответствующих точкам вне заштрихованной области на рис. 1, никаких ДДС визуально не наблюдается. Это значит, что здесь имеет место пространственно-временной хаос в системе движущихся доменов. В области 1 (рис. 1) хаотическое поступательное движение доменных границ переходит в колебательное (упорядоченное) движение около некоторых устойчивых положений равновесия. Поэтому формируются контрастные домены. Однако они имеют неопределенную форму, т.е. сохраняется пространственный хаос. Он исчезает в области 2 (рис. 1), где образуются упорядоченные ДДС. Следовательно, область 2 есть область пространственно-временной самоорганизации динамической системы магнитных доменов. В соответствии с введенными в [9,10] представлениями рис. 1 надо рассматривать как фрагмент общей динамической доменной фазовой диаграммы данной пленки феррита-граната.

4) Наконец, отметим, что в области 2 на рис. 1 имеет место самогенерация периодических процессов — вращение доменов с собственной частотой f_s , которая на несколько порядков меньше частоты переменного поля f . Это значит, что в области 2 реализуется ангерное состояние многодоменной среды, как мы его определили в

[4,5]. Это состояние возникает в условиях непрерывной энергетической накачки. В какой-то мере оно подобно возбужденному состоянию в активных средах [11], а наблюдаемые упорядоченные ДДС подобны пространственно-временным диссипативным структурам в этих средах. Заметим, что описанные ДДС не сохраняются в образце после выключения переменного поля.

Надо отметить, что гигантские упорядоченные ДДС наблюдаются далеко не на всех образцах пленок ферритов-гранатов, и мы пока не можем указать на необходимые и достаточные условия для их реализации. Для этого требуются дальнейшие систематические не только экспериментальные, но и теоретические исследования описываемых явлений.

Работа поддержана грантом № 93-02-16340 Российского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] Кандаурова Н.С., Свидерский А.Э. Статические и динамические свойства магнитоупорядоченных кристаллов. Межвуз. науч. сб. Уфа (1990). С. 8-14.
- [2] Kandaurova G.S., Sviderskiy A.E. *Physica* **B176**, 213 (1992).
- [3] Свидерский А.Э. Автореф. канд. дис. Екатеринбург (1994).
- [4] Кандаурова Н.С., Свидерский А.Э. *ЖЭТФ* **97**, 4, 1218 (1990).
- [5] Кандаурова Н.С., Иванов Ю.И. *ФММ* **76**, 1, 49 (1993).
- [6] Малоземов А., Слопзуски Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М. (1982). 382 с.
- [7] Slonczewski J.C., Malozemoff A.P., Voegeli O. *AIP Conf. Proc.* **10**, 458 (1973).
- [8] Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сигачев В.Б. *ФТТ* **29**, 8, 2247 (1987).
- [9] Кандаурова Н.С., Русинов А.А. *ДАН России* **340**, 5, 610 (1995).
- [10] Кандаурова Н.С., Кипшакбаева Ж.А. *ФТТ* **37**, 4, 1058 (1995).
- [11] Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. Автоволновые процессы. М. (1987). 240 с.