

УДК 537.6

**ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ В МАГНИТООДНООСНЫХ  
ПЛЕНКАХ КРИСТАЛЛАХ ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ****Русинова Елена Анатольевна**

Уральский государственный университет путей сообщения

(УрГУПС)

г. Екатеринбург, РФ

EARusinova@mail.ru

**Аннотация**

Экспериментально исследованы системы динамических доменных структур наблюдаемых в пленках ферритов – гранатов. В данной работе сделана попытка объяснить полученные результаты с помощью синергетической концепции самоорганизации. Выявлено, что структуры такого типа, возникают в ограниченной амплитудно – частотной области магнитного поля. Получено большое разнообразие ДДС. экспериментально показано, что в зависимости от внешних условий меняется вид самоорганизации в системе магнитных доменов.

**Ключевые слова:** доменные структуры (ДС), кольцевые домены (КД), спиральные домены (СД), переменное магнитное поле, частота

**SELF-ORGANIZATION PROCESSES IN MAGNETICALLY UNIAXIAL FILMS  
OF FERRITE-GARNET CRYSTALS****Elena A. Rusinova**

Ural State University of Railway Transport

(USURT)

Yekaterinburg, Russia

EARusinova@mail.ru

**ABSTRACT**

Systems of dynamic domain structures observed in films of ferrites – garnets have been experimentally studied. In this paper, an attempt is made to explain the results obtained using the synergistic concept of self-organization. It is revealed that structures of this type arise in a limited amplitude-frequency region of the magnetic field. A wide variety of DDSs have been obtained. It has been experimentally shown that, depending on the external conditions, the type of self-organization in the system of magnetic domains changes.

**Keywords:** domain structures, ring domains, helical domains, alternating magnetic field, frequency

### Введение

Проблема исследования пленок ферритов – гранатов является актуальной, пленки такого типа можно использовать в химии, физике, биологии и медицине. На основе перемагничивания таких пленок можно сделать сверхчувствительные датчики, которые применимы в любой области науки и техники. Данная работа является обзорной, в ней собраны основные обобщенные результаты, полученные в предыдущих исследованиях. А так же сделана попытка сопоставить полученные экспериментально данные с известными ранее.

### Материалы и методы исследования

Схема установки, на которой выполнялся эксперимент, показана на рисунке 1. В катушку (7), с небольшим количеством витков (40), питающейся от генератора ГЗ-112 (16), через усилитель (15), помещался образец (8). Образец находился в переменном магнитном поле, направленном по нормали к плоскости пленки, с помощью осциллографа С1-83 (14), измерялась амплитуда переменного магнитного поля. Контроль температуры образца, производился с помощью медь – константановой термопары. С помощью магнитно-оптического эффекта Фарадея наблюдалась доменная структура (ДС) в прозрачных эпитаксиально выращенных пленках ферритов – гранатов.

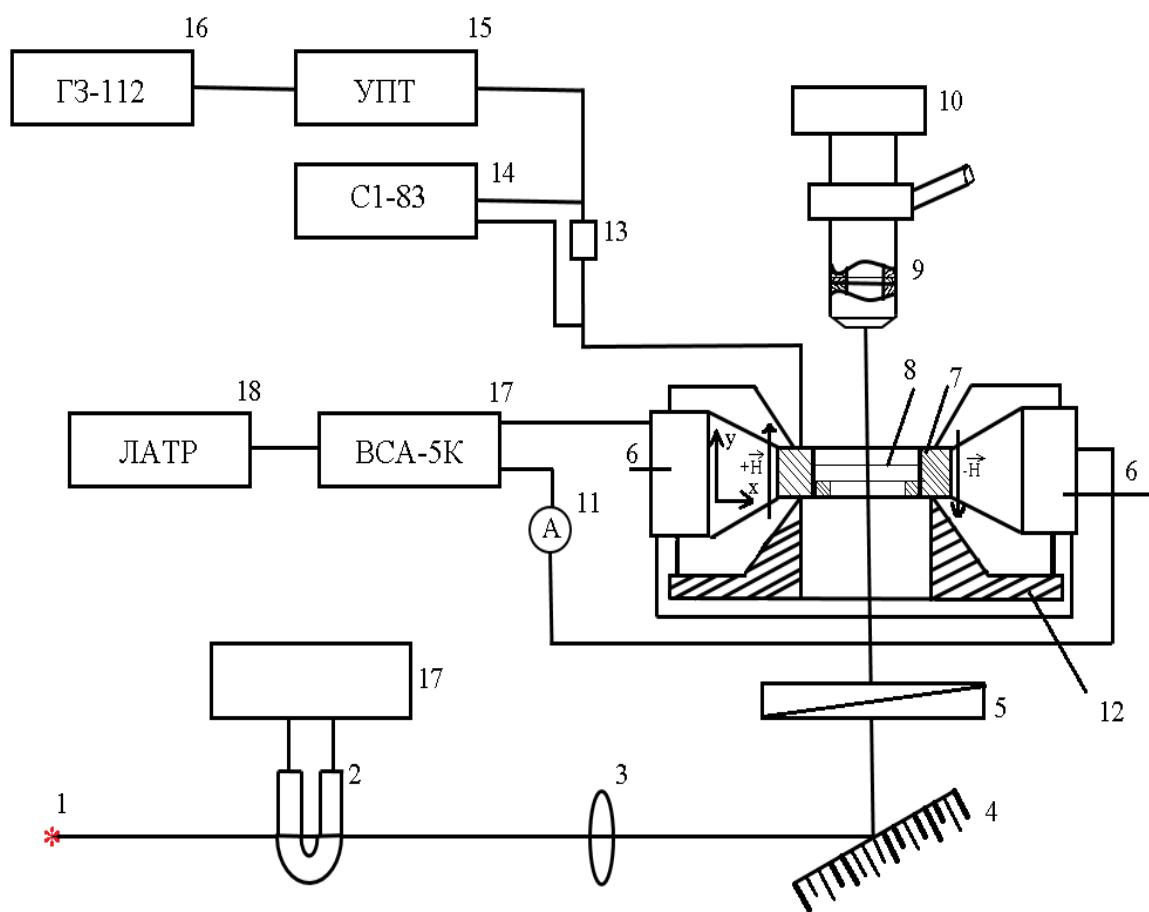
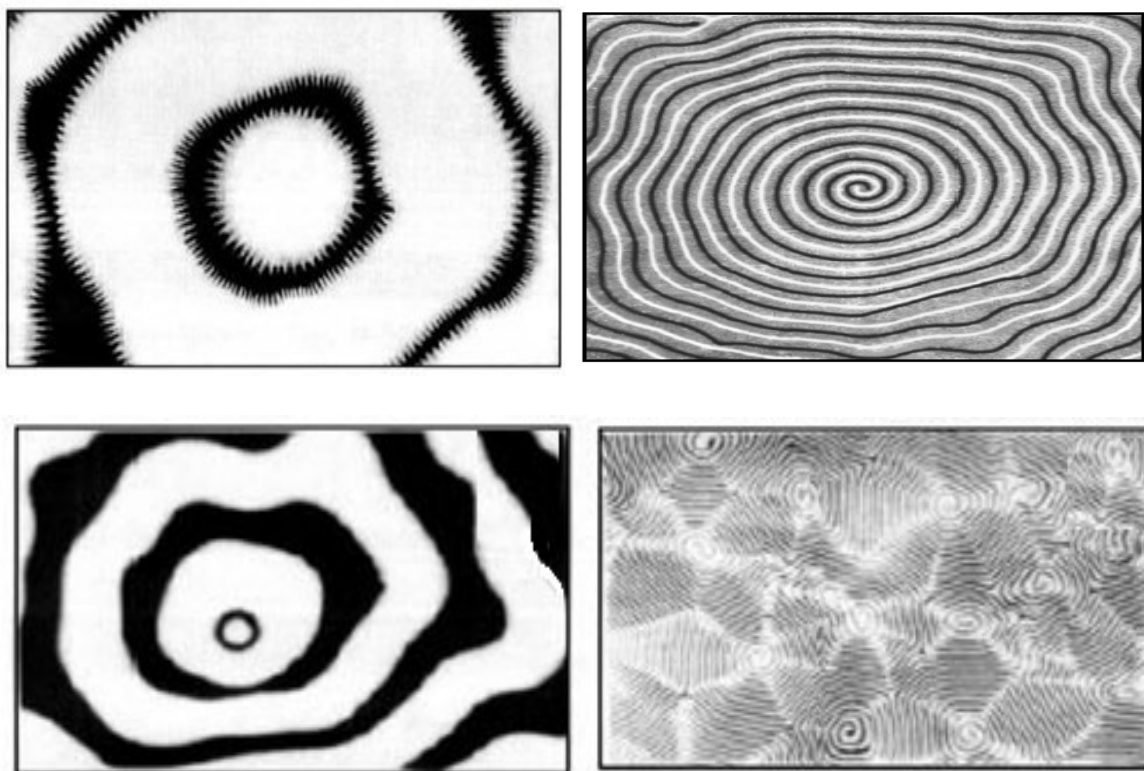


Рисунок 1. Блок схема установки для исследования ДДС, где 1 - точечный источник монохроматического света, 2 - ампа вспышка, 3 - линза фокусировки, 4 - поворотное зеркало, 5 - поляроид, 6 - проволочная катушка для создания постоянного магнитного поля, 7. проволочная катушка для создания переменного магнитного поля, 8 - подставка для образцов плёнок иттриевого граната, 9 - поляроид для анализа света в микроскопе, 10. видеокамера, 11 - амперметр, 12 - столик, 13. эталонное сопротивление, 14 - осциллограф С1-83, 15 - усилитель переменного поля, 16 - генератор ГЗ-112, 17 - выпрямитель ВСА-5К, 18 - лабораторный автотрансформатор, 19 - источник питания индивидуальной лампы.

#### Результаты эксперимента

Экспериментальные результаты можно видеть на рисунке 2, с помощью описанной выше установки при различных конфигурациях амплитуды и частоты переменного магнитного поля, магнитные домены приобретают причудливую форму [1-9]. Виды самоорганизации ДС зависят от многих параметров, температуры, поля накачки, в данном исследовании меняли только частоту  $f$  и амплитуду поля  $H_0$ . В зависимости от частоты и амплитуды постоянного и переменного магнитных полей наблюдаемая экспериментально картина статической и динамической самоорганизации меняется. На рисунке 3, показаны процессы формирования и разрушения магнитных доменов [10-15]. На фото 3.1 мы видим процесс самоорганизации, формирование кольцевого домена, так называемый Ведущий Центр (ВЦ). Фото 3.2, демонстрирует разрушение ВЦ и на 3.3 фотографии подробно показан процесс образования спирального домена.



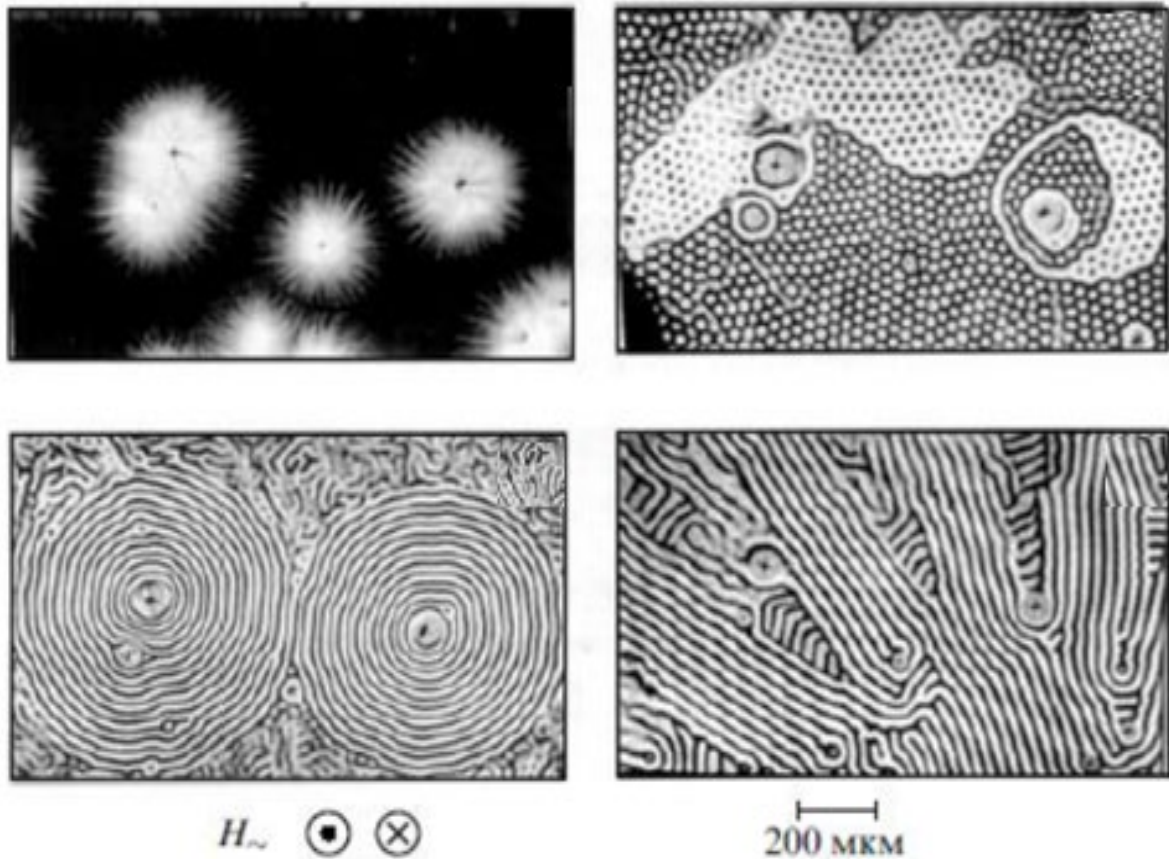


Рисунок 2. Различные виды динамических доменных структур (самоорганизация в

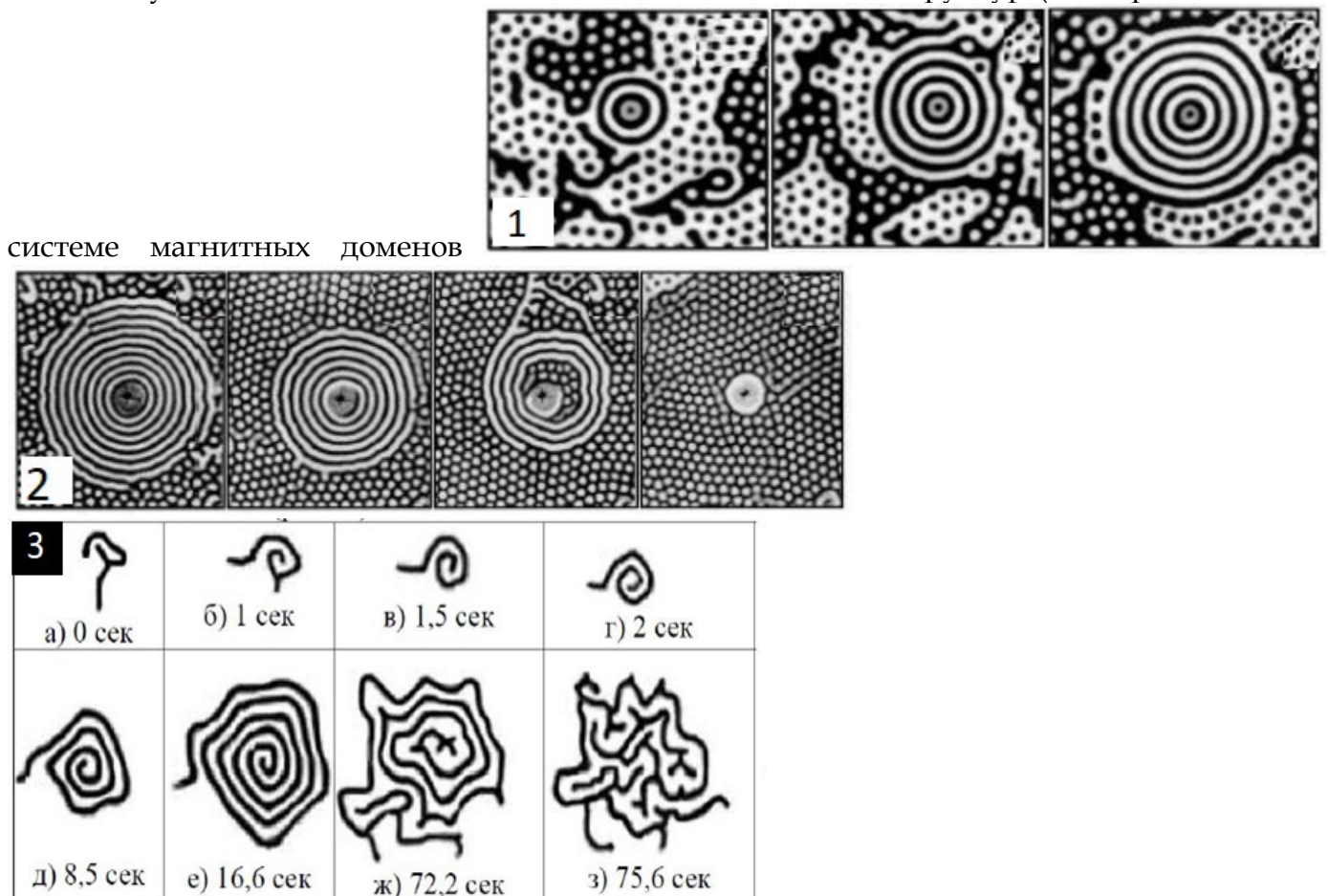


Рисунок 3. Механизм образования и разрушения спирального и кольцевого домена

Синергетика – научное течение, в котором изучаются процессы образования и взаимодействия объектов. Такие взаимодействия происходят в незамкнутых системах, в неравновесных условиях и характеризуется самопроизвольностью поведения объектов (подсистем), результатом чего является упорядочение или самоорганизация.

Синергетическая концепция самоорганизации включает в себя несколько положений, коротко рассмотрим каждое из них. Объектами исследования данной концепции являются открытые системы, находящиеся в неравновесном состоянии, которое характеризуется интенсивным обменом веществом. Конкретная система находится в некоей среде, т. е. совокупности динамических объектов. Это может быть физическая, биологическая, любая другая среда, она может быть как однородная, так и сплошная. В синергетике различают процессы организации и самоорганизации, общим для этих двух процессов является переход от хаоса к возрастающему порядку. В отличие от самоорганизации организация характеризуется образованием статических структур. Самоорганизации присущи динамические состояния системы, объекты находятся в постоянном движении. Процессы самоорганизации объектов в среде могут происходить наряду с другими процессами. В отдельные фазы существования системы могут происходить как образование, так и разрушение структуры.

Сравнивая полученные данные с известными, можно выявить много общих закономерностей. В данной работе мы ограничились внешним сходством происходящих процессов. В примерах самоорганизации, известных из неорганической химии, возникают диссипативные пространственные и временные структуры, т. е. образуется неравновесный порядок. Такой порядок состоит в появлении колебаний и волн, например, в химических диссипативных системах. Особенно ярко этот эффект проявился в так называемой реакции Белоусова-Жаботинского [17] (рис.4).

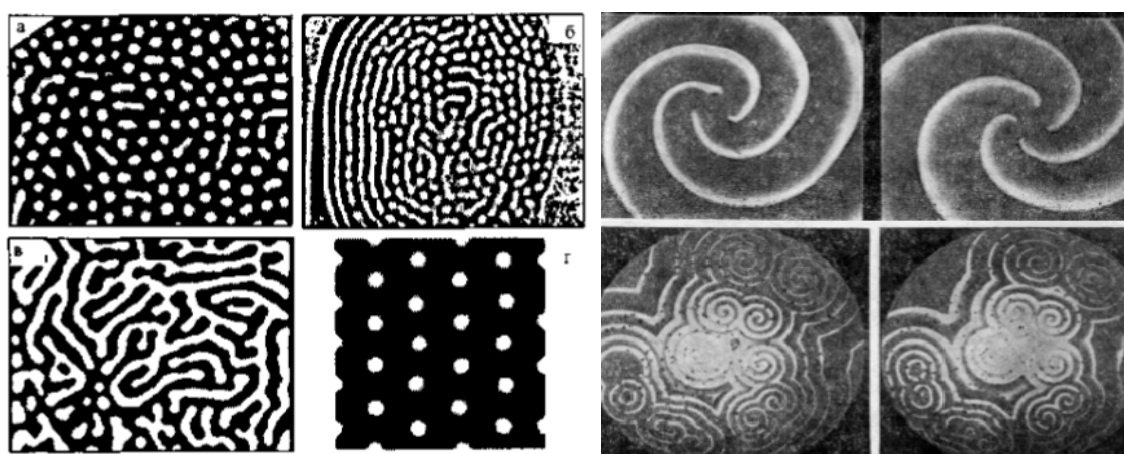


Рисунок 4. Химические волны и структуры Тьюринга в системе реакция «Белоусова-Жаботинского»

На рисунке 5 показано развитие плоской волны, на первом рисунке (а) возникает центр № 1, который появился из-за локальной флуктуации концентрации. На следующем

этапе (б) возникают два новых центра № 2 и № 3, они потом поглощаются (в) волнами от центра № 1, в результате чего возникает и развивается (г) волновая структура № 4. Есть вероятность возникновения вариантов (д и е), когда появляется уже более сложная картина, состоящая из нескольких начальных центров. Такие пространственно-временные структуры, рассматриваются как автоволновые или автоколебательные процессы [18]. Данные процессы существуют за счет оттока энтропии из системы, так же могут образовываться спиральные волны. Отчетливо прослеживается визуальное совпадение с наблюдаемыми экспериментально доменными структурами.

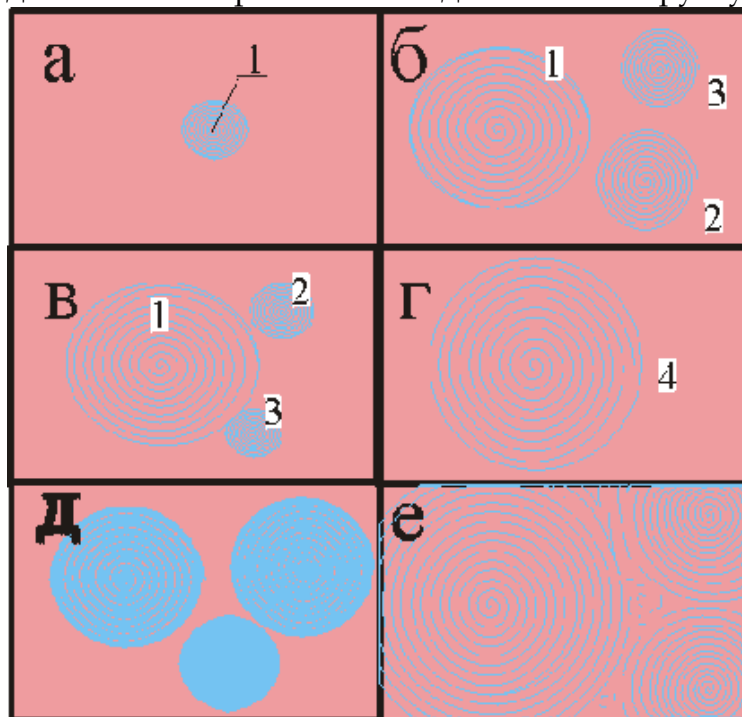


Рисунок 5. Химические (волновые) процессы в тонких слоях раствора (двумерные системы).

Построены двумерные и трехмерные фазовые диаграммы. На рисунках 6 и 7 можно видеть, что данные структуры существуют в ограниченной области. На рис.6 построены трехмерные диаграммы для магнитных доменов типа Ведущий центр (ВД), из рисунков хорошо видно как меняется число колец для разных ВЦ ( $N$ ) в зависимости от частоты  $f$  и амплитуды магнитного поля  $H_0$ . Так же можно видеть зависимость частоты зарождения колец ВЦ ( $f_s$ ), от частоты и амплитуды поля и изменение времени жизни Ведущего центра ( $T_g$ ) в амплитудно – частотной области.

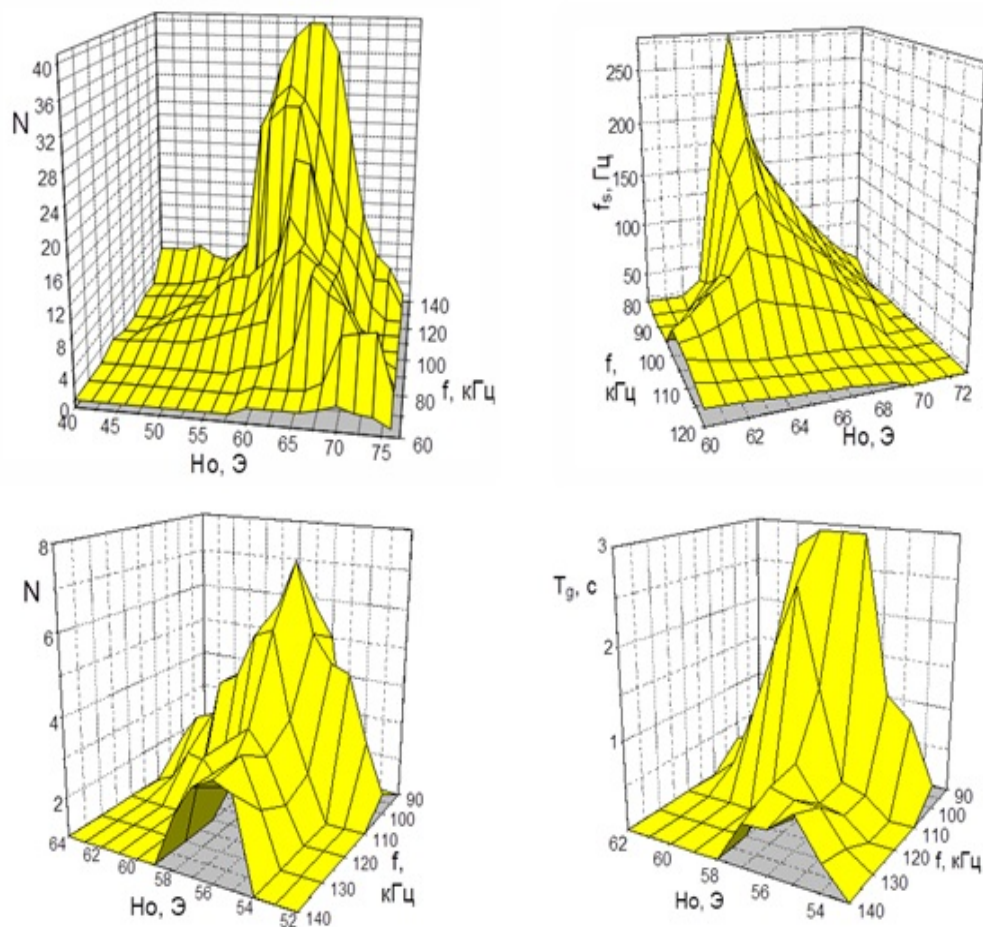


Рисунок 6. Трехмерные фазовые диаграммы

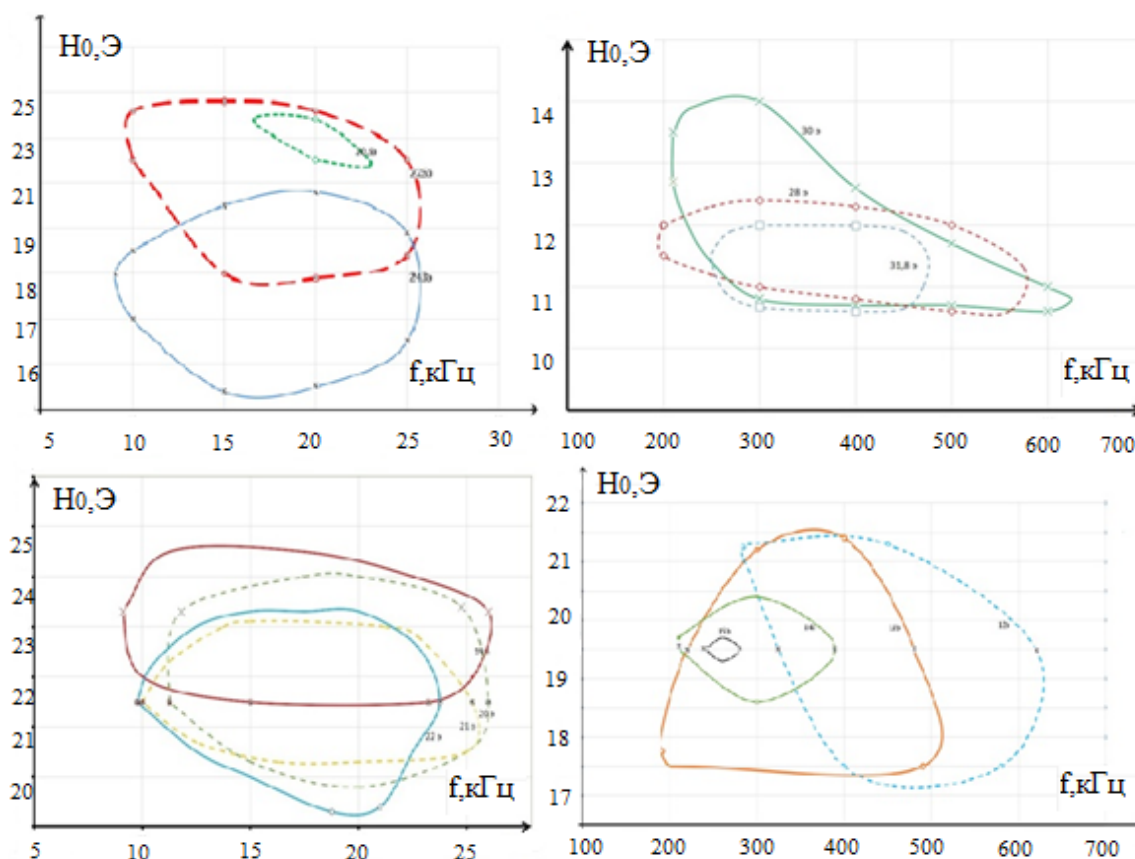


Рисунок 7. Двумерные фазовые диаграммы

На рисунке 7 построены двумерные фазовые диаграммы, для различных видов ДС, видно что доменные структуры занимают на графике определенные области (амплитудно ( $H_0$ ) – частотные ( $f$ )). Меняя эти параметры, можно наблюдать структуры различного вида.

#### Выводы

Исследовались процессы самоорганизации в хаотически движущейся системе динамических доменных структур возникающих в плёнках-кристаллах ферритов-гранатов. Получены и обработаны экспериментальные данные, сделана попытка объяснить причину возникновения самоорганизации в тонких пленках. Выявлены некоторые закономерности и характер их изменения. Построены трехмерные и двумерные области существования ДС. Установлена зависимость возникновения очагов самоорганизации от параметров переменного магнитного поля. Проведен анализ сравнения полученных на опыте структур с известными ранее.

#### Список литературы:

1. Балбашов, А. М. Магнитные материалы для микроэлектроники / А. М. Балбашов, А. Я. Червоненкис. – Москва: Энергия, 1979.
2. Кандаурова, Г. С. Процессы самоорганизации в многодоменных магнитных средах и формирование устойчивых динамических структур / Г. С. Кандаурова, А. Э. Свидерский // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1990. Т. 97, вып. 4. – С. 1218–1229.



3. Кандаурова, Г.С. Эволюция спиральных динамических доменов в ангерном состоянии пленок ферритов-гранатов / Г.С. Кандаурова, В.Х. Осадченко, А.А.Русинов, Е.А. Русинова// Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики.– 1996. Т.63, вып.6.– С. 453–456.
4. Кандаурова, Г.С. Трехмерные диаграммы существования индуцированных ангерных состояний многодоменной магнитной среды / Г.С. Кандаурова, А.А.Русинов // Физика твердого тела. – 1998.Т.40, вып.10. – С. 1865–1870.
5. Кандаурова, Г.С. Фазовые диаграммы динамических систем магнитных доменов / Г.С. Кандаурова, А.А.Русинов // Доклады Академии Наук – 1995.Т.340, N5.– С. 610–613.
6. Кандаурова, Г.С. Спиральные динамические домены индуцированные полем смещения / Г.С. Кандаурова, А.А.Русинов // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики–1997.Т.65, вып.1.– С. 60–64.
7. Кандаурова, Г.С. Трехмерные диаграммы существования индуцированных ангерных состояний многодоменной магнитной среды / Г.С. Кандаурова, А. А.Русинов // Физика твердого тела. – 1998. Т.40, вып.10. – С.1865–1870.
8. Русинов, А.А. Моделирование условий, благоприятных для образования Упорядоченных динамических спиральных доменов в пленках ферритов-гранатов / А.А. Русинов, Е.А. Русинова//Вестник Уральского государственного университета путей сообщения – 2014. № 2 (22).– С. 19–27.
9. Русинов, А.А. Феноменологический подход к описанию динамических параметров доменов спирального типа / А.А. Русинов, Е.А. Русинова //Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2015. № 1 (25). – С. 18–23.
10. Русинов, А.А. Моделирование процессов динамических спиральных доменов в пленках ферритов-гранатов / А.А. Русинов, Е.А. Русинова, Е.И. Авксентьева //Вестник современных исследований. –2018. № 12.1 (27). С. 401–402.
11. Rusinov A.A. Phase diagrams of dynamic system of magnetic domains / A.A. Rusinov, E.A.Rusinova// International independent scientific journal. – 2020. №21, Vol.2.– P. 61–63.
12. Крючкова Д. С. Влияние магнитного поля на динамические параметры доменных структур типа «Ведущий центр»/Д.С.Крючкова, Е.А.Русинова// Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. Стерлитамак. – 2021. С. 5–12.
13. Русинов А.А. Амплитудно – частотные зависимости формирования динамических доменных структур в магнитоодноосных пленках – кристаллах ферритов – гранатов/А.А.Русинов, Е.А.Русинова,И.В.Поленц//В сборнике: Математическое моделирование и информационные технологии при решении прикладных задач в транспортном вузе. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Екатеринбург.–2021. С. 91–100.
14. Русинова Е.А.Статистические параметры доменных структур в пленках железного граната./РусиноваЕ.А., Бурьлова А.А.// В сборнике: Актуальные проблемы инженерных наук. Сборник статей региональной студенческой научно-технической конференции. Новосибирск, 2022. С. 68–73.

15. Русинов А.А. Динамические доменные структуры – « Ведущий центор» на искусственных и естественных дефектах /Русинов А.А., Русинова Е.А./ //В сборнике: Инновационные технологии обучения математическому и имитационному моделированию студентов транспортного вуза. Сборник научных трудов. Под научной редакцией Г. А. Тимофеевой, О. В. Куликовой. Екатеринбург, 2022. С. 119–124.
16. Rusinov A. A. Study of the dependence of the frequency of formation of ring domain structures on the amplitude of the alternating magnetic field /A. A. Rusinov; E. A. Rusinova //AIP Conference Proceedings 2476, 030009 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0103876>.
17. Жаботинский А. М. / Биофизика. 1964. Т. 9. С. 306/А.М. Жаботинский // ДАН СССР. 1964. Т. 157. С. 392.
18. Филд Р. Колебания и бегущие волны в химических системах / Р. Филд, М. Бургер // – М.: Мир, 1988.

#### References:

1. Balbashov, A.M. Magnetic materials for microelectronics/ A.M. Balbashov, A.Ya. Chervonenkis.– Moscow: Energia, 1979.
2. Kandaurova, G.S. Processes of self-organization in multi-domain magnetic media and the formation of stable dynamic structures / G.S. Kandaurova, A.E. Svidersky // Journal of Experimental and Theoretical of physics. – 1990. Vol. 97, issue 4. – pp. 1218-1229.
3. Kandaurova, G.S. Evolution of spiral dynamic domains in the angered state of ferrite-garnet films / G.S. Kandaurova, V.H. Osadchenko, A.A.Rusinov, E.A. Rusinova// Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics.– 1996. Vol.63, vol.6.– pp. 453-456.
4. Kandaurova, G.S. Three-dimensional diagrams of the existence of induced atmospheric states of a multi-domain magnetic medium / G.S. Kandaurova, A.A.Rusinov // Solid State Physics. – 1998.T.40, issue 10. – pp. 1865-1870.
5. Kandaurova, G.S. Phase diagrams of dynamic systems of magnetic domains / G.S. Kandaurova, A.A.Rusinov //Reports of the Academy of Sciences – 1995.T.340, N5.– pp. 610-613.
6. Kandaurova, G.S. Spiral dynamic domains induced by the displacement field / G.S. Kandaurova, A.A.Rusinov // Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics–1997.T.65, vol.1.– pp. 60-64.
7. Kandaurova, G.S. Three-dimensional diagrams of the existence of induced atmospheric states of a multi-domain magnetic medium / G.S. Kandaurova, A. A.Rusinov // Solid state Physics. - 1998. Vol.40, issue 10. – pp.1865–1870.
8. Rusinov, A.A. Modeling of conditions favorable for the formation of ordered dynamic spiral domains in ferrite-garnet films / A.A. Rusinov, E.A. Rusinova//Bulletin of the Ural State University of Railways – 2014. № 2 (22).– Pp. 19-27.
9. Rusinov, A.A. Phenomenological approach to the description of dynamic parameters of spiral type domains / A.A. Rusinov, E.A. Rusinova //Bulletin of the Ural State University of Railways. – 2015. № 1 (25). – Pp. 18-23.

10. Rusinov, A.A. Modeling of processes of dynamic spiral domains in ferrite-garnet films / A.A. Rusinov, E.A. Rusinova, E.I. Avksentieva // Bulletin of Modern Research. -2018. No. 12.1 (27). pp. 401-402.
11. Rusinov.A. Phase diagrams of dynamic system of magnetic domains / A.A. Rusinov, E.A.Rusinova// International independent scientific journal. – 2020. №21, Vol.2.– P. 61–63.
12. Kryuchkova D. S. The influence of the magnetic field on the dynamic parameters of domain structures of the "Leading Center" type/D.S.Kryuchkova, E.A.Rusinova// Collection of articles on the results of the International Scientific and Practical Conference. Sterlitamak. – 2021. pp. 5-12.
13. Rusinov A.A. Amplitude-frequency dependences of the formation of dynamic domain structures in magnetically uniaxial ferrite-garnet crystal films/A.A.Rusinov, E.A.Rusinova, I.V.Polents//In the collection: Mathematical modeling and information technologies in solving applied problems in a transport university. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ural State University of Railway Transport". Catherineburg.-2021. pp. 91-100.
14. Rusinova E.A. Statistical parameters of domain structures in iron garnet films./RusinovaE.A., Burylova A.A.// In the collection: Actual problems of engineering sciences. Collection of articles of the regional student scientific and technical conference. Novosibirsk, 2022. pp. 68-73.
15. Rusinov A.A. Dynamic domain structures - "Leading center" on artificial and natural defects /Rusinov A.A., Rusinova E.A.// In the collection: Innovative technologies of teaching mathematical and simulation modeling to students of a transport university. Collection of scientific papers. Under the scientific editorship of G. A. Timofeeva, O. V. Kulikova. Yekaterinburg, 2022. pp. 119-124.
16. RusinovA. A. Study of the dependence of the frequency of formation of ring domain structures on the amplitude of the alternating magnetic field / A. A. Rusinov; E. A. Rusinova // AIP Conference Proceedings 2476, 030009 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0103876> .
17. Jabotinsky A.M. / Biophysics. 1964. Vol. 9. P. 306/A.M. Jabotinsky // DAN USSR. 1964. Vol. 157. P. 392.
18. Field R. Vibrations and traveling waves in chemical systems / R. Field, M. Bur