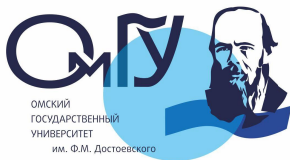


Моделирование магнитных свойств и гистерезисных явлений в усложненной спин-вентильной наноструктуре

Дроворуб Егор Витальевич

DrovorubEV@stud.omsu.ru



Кафедра теоретической физики
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Научный руководитель
д.ф.-м.н., проф. Прудников Владимир Васильевич

Одним из наиболее перспективных направлений применения материалов с эффектом гигантского магнитосопротивления является создание высокочувствительных головок для считывания информации с магнитных носителей [1]. В качестве активных элементов спинтроники выступают спин-вентильные наноструктуры [2]. В настоящее время разработаны различные виды спиновых вентилях (усложненный спиновый вентиль). Такие структуры характеризуются высокой чувствительностью к магнитному полю при комнатных температурах. Целью данной выпускной квалификационной работы является моделирование магнитных свойств и гистерезисных явлений в усложненной спин-вентильной наноструктуре и изучение факторов, влияющих на проявление эффектов гистерезиса.

¹Baibich M. N., Broto J. M., Fert A. et al. // Phys. Rev. Lett. 1988. Vol. 61. P. 2472–2476

²Dieny B. // J. Magn. Magn. Mater. 1994. Vol. 136. P. 335359.

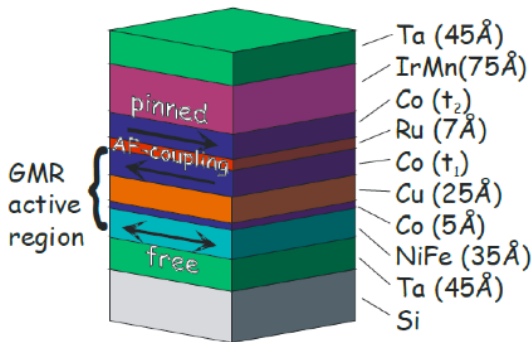


Рис. 1: Модель структуры спинового вентиль, состоящего из трех ферромагнитных пленок, разделенных пленкой немагнитного металла (С. Marrow, 2008).

Гамильтониан системы с анизотропией типа «легкая плоскость» [3]:

$$H = - \sum_{\langle i,j \rangle} J_{ij} \{ S_i^x S_j^x + 0.8 \cdot S_i^y S_j^y + (1 - \Delta_1(N)) S_i^z S_j^z \} - h \sum_i S_i^x, \quad (1)$$

Также исследуется структура с анизотропией типа «легкая ось», гамильтониан для которой записывается в виде [3]:

$$H = - \sum_{\langle i,j \rangle} J_{ij} \{ (1 - \Delta_2(N)) (S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y) + S_i^z S_j^z \} - h \sum_i S_i^z, \quad (2)$$

где $S_i = (S_i^x, S_i^y, S_i^z)$ - трехмерный единичный вектор спина, зафиксированный в i -ом узле ГЦК-решетки. $\Delta_{1,2}(N)$ - параметр учитывающий влияние анизотропии, создаваемой полем подложки, на магнитные свойства пленки в зависимости от ее толщины N . J_{ij} - обменный интеграл, характеризующий взаимодействие ближайших спинов в пленке.

³Prudnikov P. V., Prudnikov V. V., Menshikova M. A., Piskunova N. I. // J. Magn. Magn. Mater. 2015. Vol. 387. P. 77–82.

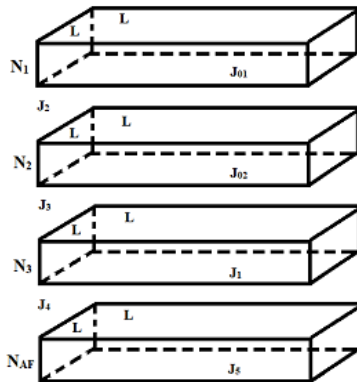


Рис. 2: Модель усложненной спин-вентильной структуры. Сверху расположены три ферромагнитных пленки, разделенных немагнитным металлом. Нижняя пленка плотно закреплена с толстым слоем антиферромагнетика, который фиксирует ориентацию намагниченности пленки. L , N_1 , N_2 , N_3 и N_{AF} - линейные размеры пленок, J_{01} , J_{02} , J_1 , J_2 , J_3 , J_4 , J_5 - обменные интегралы.

- ▶ Гранецентрированная кубическая решетка: $L * L * N$;
- ▶ Линейный размер: $L = 32$;
- ▶ Периодические граничные условия в плоскости пленки;
- ▶ Значения обменных интегралов внутрислоевого взаимодействия задавались как $J_1/k_b T = 1$, $J_{01}/J_1 = 0.4$, $J_{02}/J_1 = 0.75$, а межслоевого взаимодействия $J_2/J_1 = 0.01$. Межслоевое взаимодействие средней и закрепленной пленок носит сильный антиферромагнитный характер $J_3/J_1 = -3.0$. Для моделирования свойств антиферромагнетика вводится отрицательный интеграл внутрислоевого междоузельного взаимодействия $J_5/J_1 = -2.0$. Межслоевое взаимодействие антиферромагнетика и закрепленной пленки описывается с помощью обменного интеграла $J_4/J_1 = -2.0$;
- ▶ Алгоритм Метрополиса.

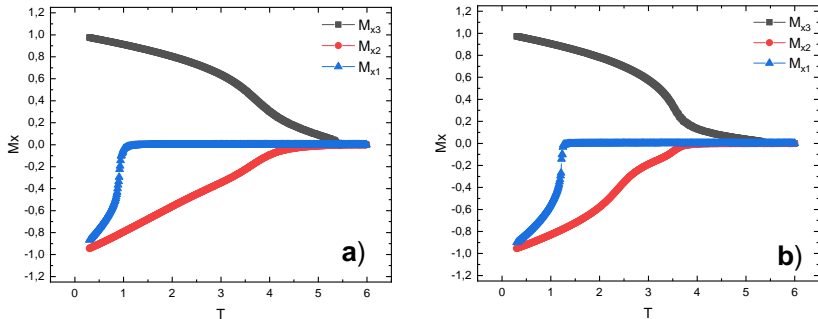


Рис. 3: Температурная зависимость равновесной намагниченности ферромагнитных пленок с толщинами (а) $N_1 = N_2 = N_3 = 3$ МС и (б) $N_1 = N_2 = N_3 = 7$ МС с анизотропией типа «легкая плоскость». Значения обменных интегралов межслоевого и внутрислоевого взаимодействия полагались равными $J_3 = -3.0$ и $J_{02} = 0.75$ соответственно.

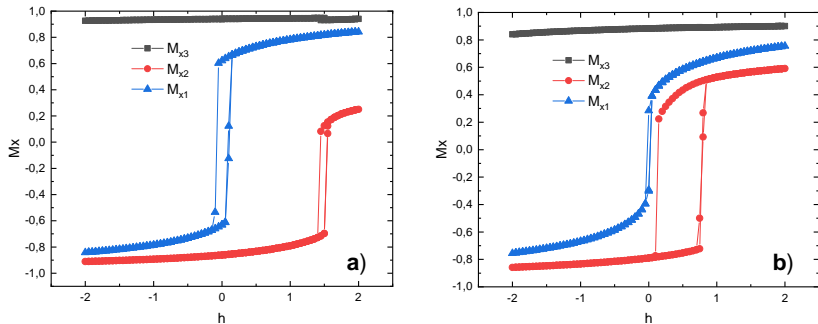


Рис. 4: Петли гистерезиса для отдельных пленок с толщинами (а) $N_1 = N_2 = N_3 = 3$ МС и (б) $N_1 = N_2 = N_3 = 7$ МС с анизотропией типа «легкая плоскость» при температурах $T = 0.7J_1/k_b$ и $T = 1.2J_1/k_b$ соответственно. Значения обменных интегралов межслоевого (J_3) и внутрислоевого (J_{02}) взаимодействия полагались равными $J_3 = -3.0$ и $J_{02} = 0.75$.

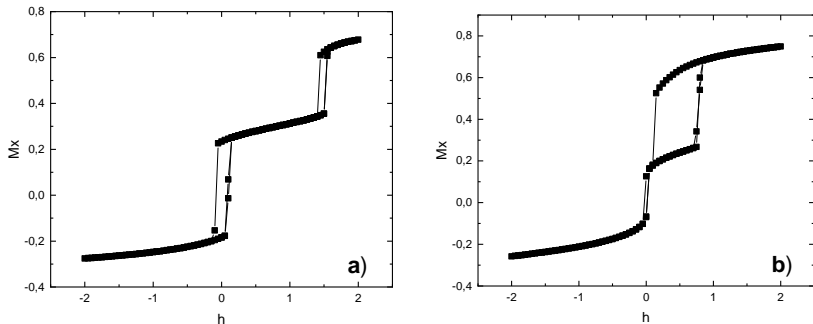


Рис. 5: Общая петля гистерезиса трёх ферромагнитных пленок с толщинами (а) $N_1 = N_2 = N_3 = 3$ МС и (б) $N_1 = N_2 = N_3 = 7$ МС с анизотропией типа «легкая плоскость» при температурах $T = 0.7J_1/k_b$ и $T = 1.2J_1/k_b$ соответственно. Значения обменных интегралов межслоевого (J_3) и внутрислоевого (J_{02}) взаимодействия полагались равными $J_3 = -3.0$ и $J_{02} = 0.75$.

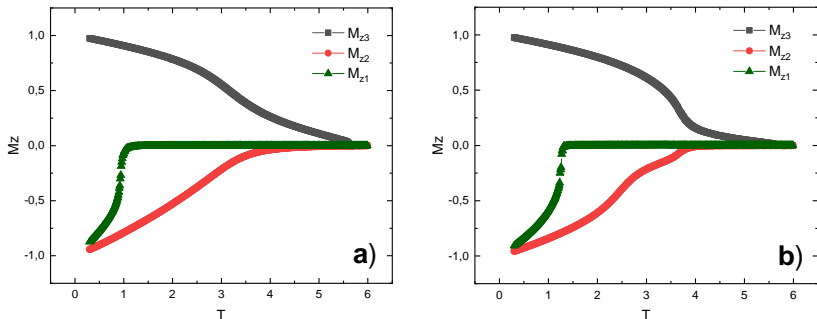


Рис. 6: Температурная зависимость равновесной намагниченности ферромагнитных пленок с толщинами (а) $N_1 = N_2 = N_3 = 3$ МС и (б) $N_1 = N_2 = N_3 = 7$ МС с анизотропией типа «легкая ось». Обменный интеграл внутрислоевого взаимодействия имеет значение $J_{02} = 0.75$. Обменный интеграл межслоевого взаимодействия J_3 равняется в случае (а) $J_3 = -2.0$, в случае (б) $J_3 = -3.0$.

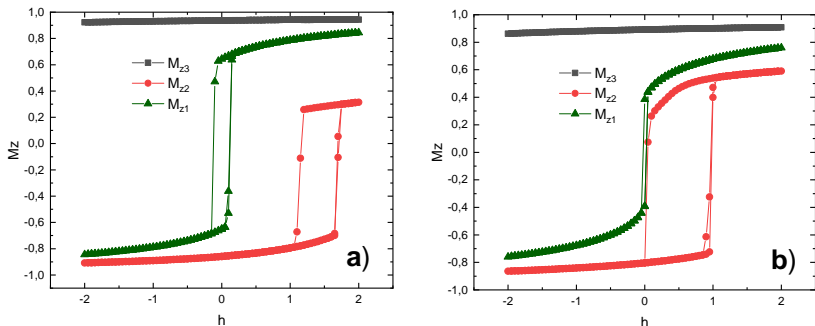


Рис. 7: Петли гистерезиса для отдельных пленок с толщинами (а) $N_1 = N_2 = N_3 = 3$ MC и (б) $N_1 = N_2 = N_3 = 7$ MC с анизотропией типа «легкая ось» при температурах $T = 0.7J_1/k_b$ и $T = 1.2J_1/k_b$ соответственно. Обменный интеграл внутрислоевого взаимодействия имеет значение $J_{02} = 0.75$. Обменный интеграл межслоевого взаимодействия J_3 равняется в случае (а) $J_3 = -2.0$, в случае (б) $J_3 = -3.0$.

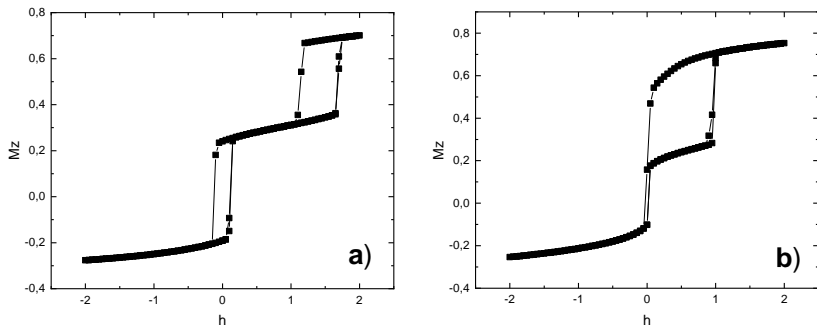


Рис. 8: Общая петля гистерезиса трёх ферромагнитных плёнок с толщинами (а) $N_1 = N_2 = N_3 = 3$ МС и (б) $N_1 = N_2 = N_3 = 7$ МС с анизотропией типа «легкая ось» при температурах $T = 0.7J_1/k_b$ и $T = 1.2J_1/k_b$ соответственно. Обменный интеграл внутрислоевого взаимодействия имеет значение $J_{02} = 0.75$. Обменный интеграл межслоевого взаимодействия J_3 равняется в случае (а) $J_3 = -2.0$, в случае (б) $J_3 = -3.0$.

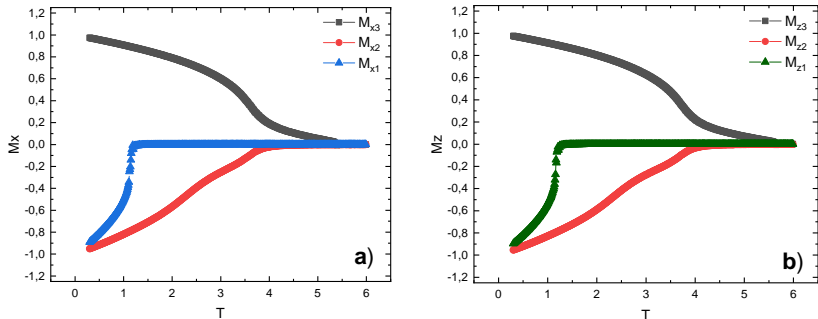


Рис. 9: Температурная зависимость равновесной намагниченности ферромагнитных пленок с толщинами $N_1 = N_2 = N_3 = 5$ МС для различных типов анизотропии (а) «легкая плоскость» и (б) «легкая ось». Значения обменных интегралов межслоевого и внутрислоевого взаимодействия полагались равными $J_3 = -3.0$ и $J_{02} = 0.75$ соответственно.

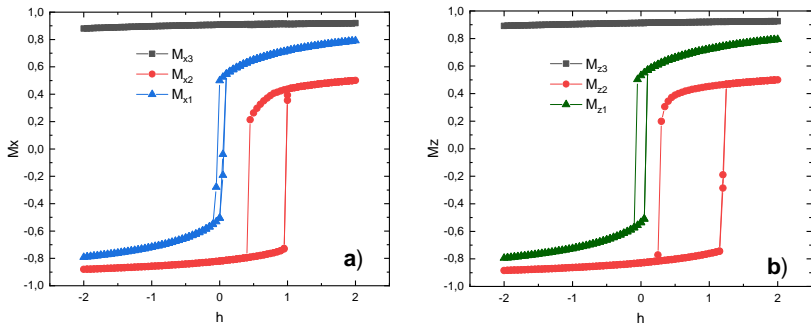


Рис. 10: Петли гистерезиса для отдельных пленок с толщинами $N_1 = N_2 = N_3 = 5$ MC для различных типов анизотропии (a) «легкая плоскость» и (b) «легкая ось» при температуре $T = 1.0J_1/k_b$. Значения обменных интегралов межслоевого и внутрислоевого взаимодействия полагались равными $J_3 = -3.0$ и $J_{02} = 0.75$ соответственно.

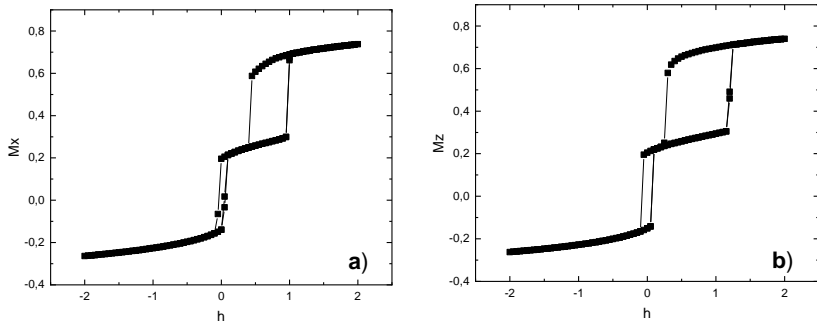


Рис. 11: Общая петля гистерезиса трёх ферромагнитных пленок с толщинами $N_1 = N_2 = N_3 = 5$ МС для различных типов анизотропии (а) «легкая плоскость» и (б) «легкая ось» при температуре $T = 1.0J_1/k_B$. Значения обменных интегралов межслоевого и внутрислоевого взаимодействия полагались равными $J_3 = -3.0$ и $J_{02} = 0.75$ соответственно.

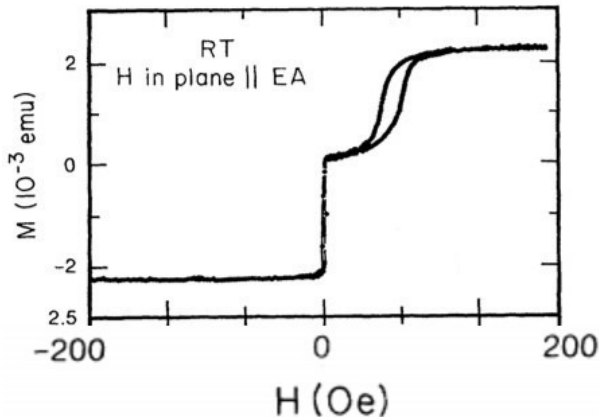


Рис. 12: Петля гистерезиса для структуры Si/(150-Å NiFe)/(26-Å Cu)/(150-Å NiFe)/(100-Å FeMn)/(20-Å Ag) [2].

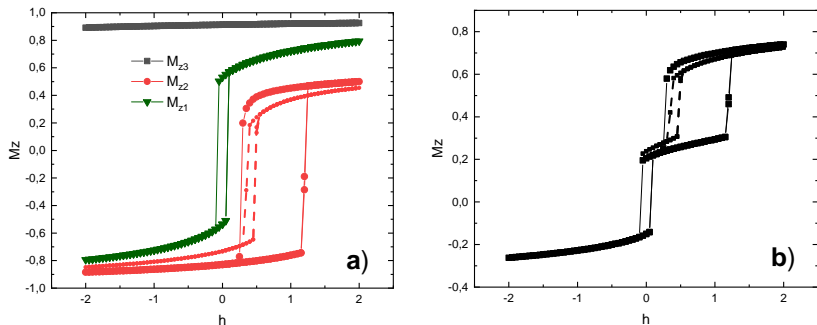


Рис. 13: Петли гистерезиса для отдельных пленок (а) и всей структуры (б) с толщинами $N_1 = N_2 = N_3 = 5$ МС с анизотропией типа «легкая ось» при температуре $T = 1.0J_1/k_B$ со значением обменного интеграла внутрислоевого взаимодействия $J_{02} = 0.75$. Пунктирными линиями обозначен случай с обменным интегралом $J_{02} = 0.5$. Обменный интеграл межслоевого взаимодействия J_3 полагался равным $J_3 = -3.0$.

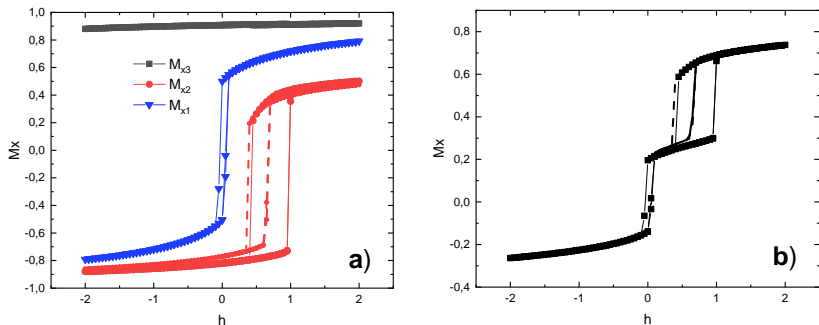


Рис. 14: Петли гистерезиса для отдельных пленок (а) и всей структуры (б) с толщинами $N_1 = N_2 = N_3 = 5$ МС с анизотропией типа «легкая плоскость» при температуре $T = 1.0J_1/k_b$ со значением обменного интеграла внутрислоевого взаимодействия $J_{02} = 0.75$. Пунктирными линиями обозначен случай с обменным интегралом $J_{02} = 0.5$. Обменный интеграл межслоевого взаимодействия J_3 полагался равным $J_3 = -3.0$.

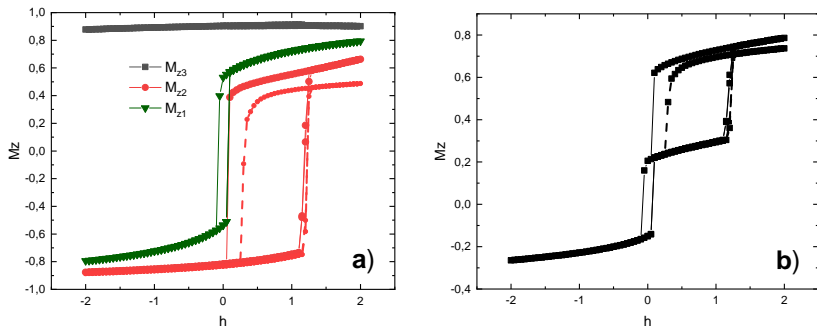


Рис. 15: Петли гистерезиса для отдельных пленок (а) и всей структуры (б) с толщами $N_1 = N_2 = N_3 = 5$ МС с анизотропией типа «легкая ось» при температуре $T = 1.0J_1/k_B$ со значением обменного интеграла межслоевого взаимодействия $J_3 = -1.5$. Пунктирными линиями обозначен случай с обменным интегралом $J_3 = -4.0$. Обменный интеграл внутрислоевого взаимодействия J_{02} полагался равным $J_{02} = 0.75$.

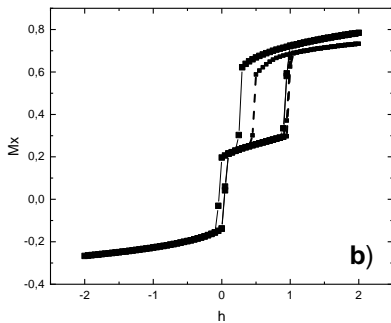
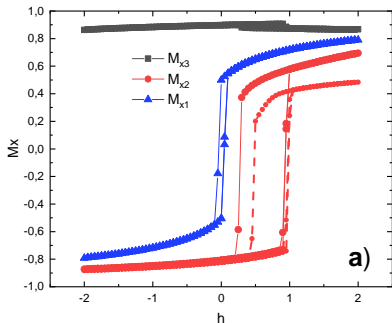


Рис. 16: Петли гистерезиса для отдельных пленок (а) и всей структуры (б) с толщинами $N_1 = N_2 = N_3 = 5$ МС с анизотропией типа «легкая плоскость» при температуре $T = 1.0J_1/k_b$ со значением обменного интеграла межслоевого взаимодействия $J_3 = -1.5$. Пунктирными линиями обозначен случай с обменным интегралом $J_3 = -4.0$. Обменный интеграл внутрислоевого взаимодействия J_{02} полагался равным $J_{02} = 0.75$.

- ▶ Получена зависимость магнитных характеристик пленок от температуры и внешнего магнитного поля, которая хорошо согласуется с экспериментом.
- ▶ Исследовано влияние на проявление гистерезисных эффектов различных типов магнитной анизотропии, толщины магнитных пленок, температуры и величины интегралов внутрислоевого и межслоевого обменного взаимодействия.
- ▶ Выделены факторы, позволяющие влиять на магнитные свойства ферромагнитных пленок и проявление эффектов гистерезиса в структуре.
- ▶ Результаты исследований были представлены в докладах на XLV региональной студенческой научно-практической конференции «Молодежь третьего тысячелетия» (Омск, 2021), на XXI Всероссийской школе - семинаре по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-21, Екатеринбург, 2021), а также опубликованы в научном журнале «Вестник Омского университета», 2020, т. 25, № 4, с. 36-45.

Спасибо за внимание!