

УДК 538.915

## МАГНИТНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И АНИЗОТРОПИЯ РАССЕЙЯНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В АНТИФЕРРОМАГНИТНОМ МЕТАЛЛЕ $\text{Ho}_{0.5}\text{Lu}_{0.5}\text{V}_{12}$ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ЗАРЯДОВЫМИ СТРАЙПАМИ

© 2019 г. Н. Е. Случанко<sup>1,2,\*</sup>, А. Л. Хорошилов<sup>1,2</sup>, В. Н. Краснорусский<sup>1</sup>, А. В. Богач<sup>1</sup>,  
В. В. Глушков<sup>1,2</sup>, С. В. Демишев<sup>1,2</sup>, К. М. Красиков<sup>2</sup>,  
Н. Ю. Шицевалова<sup>3</sup>, В. Б. Филиппов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики  
имени А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”,  
Долгопрудный, Россия

<sup>3</sup>Институт проблем материаловедения имени И.М. Францевича Национальной академии наук Украины,  
Киев, Украина

\*E-mail: nes@it.gpi.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

При гелиевых температурах выполнены исследования поперечного магнетосопротивления, теплоемкости и намагниченности однодоменных монокристаллических образцов додекаборида  $\text{Ho}_{0.5}\text{Lu}_{0.5}\text{V}_{12}$  со структурой каркасного стекла. Показано, что анизотропия рассеяния носителей заряда в антиферромагнитной фазе обусловлена динамическими зарядовыми страйпами, ориентированными вдоль направлений  $\langle 110 \rangle$  в гцк решетке.

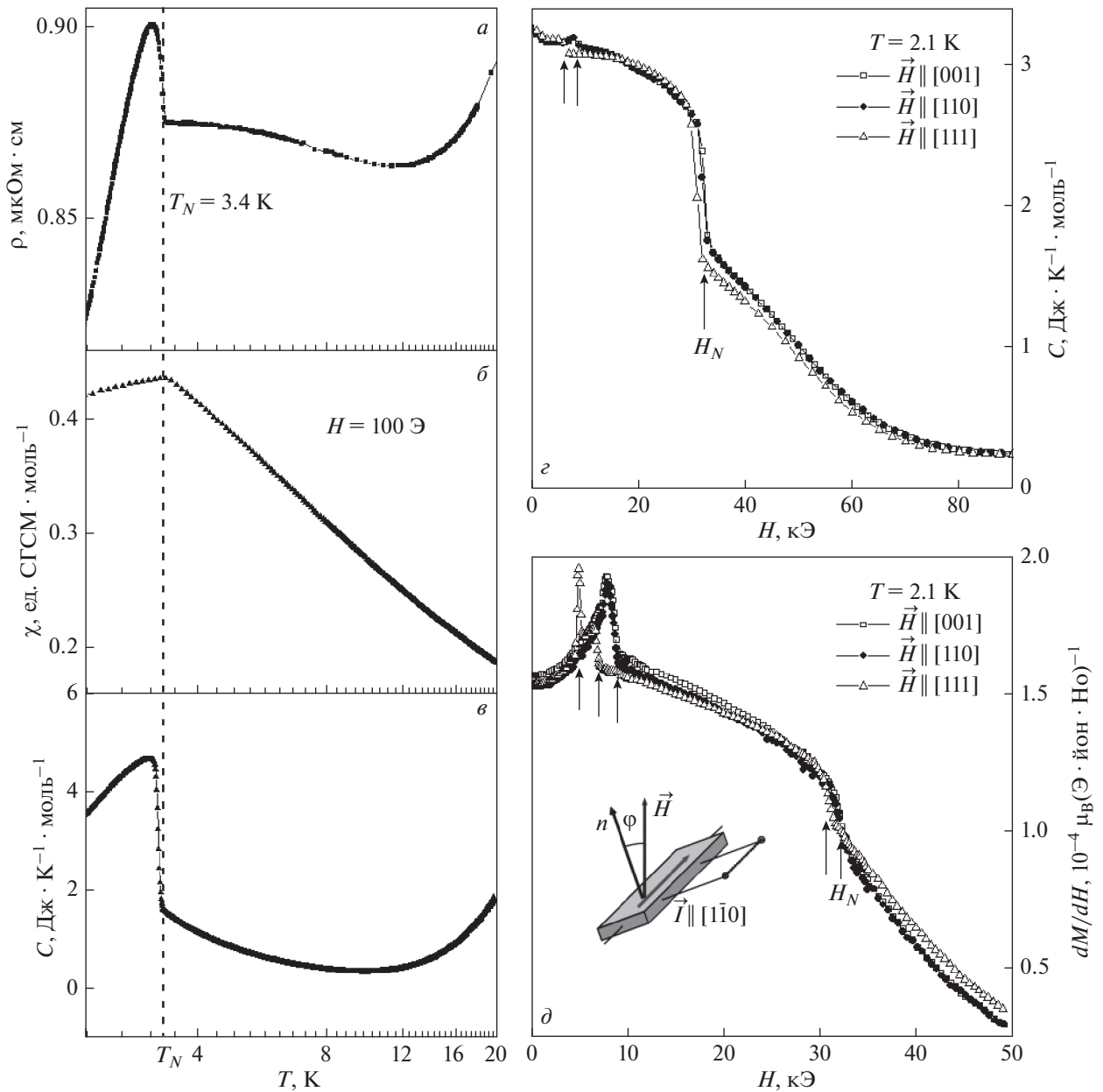
DOI: 10.1134/S0367676519070378

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время значительный интерес исследователей вызывают соединения с электронной/структурной неустойчивостью, в которых интерференция нескольких конкурирующих между собой механизмов приводит к фазовому расслоению, возникновению сложных магнитных фаз и фазовых диаграмм [1]. При этом изучение таких систем с сильными электронными корреляциями, как манганиты, ВТСП-купраты и др., затруднено вследствие их многокомпонентного химического состава, сложных элементарной ячейки и кристаллической структуры.

Недавно при исследованиях каркасных стекол  $\text{RB}_{12}$  [2] было обнаружено формирование динамических полос заряда (страйпов), которые возникают в матрице редкоземельных додекаборидов вследствие кооперативного динамического эффекта Яна–Теллера в борной подрешетке [3, 4]. Для магнитных додекаборидов  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{V}_{12}$  было установлено возникновение значительной анизотропии рассеяния носителей заряда в магнитном поле в парамагнитном (P) состоянии, ниже перехода в фазу каркасного стекла  $T < T^* \approx 60$  К [5]. Авторами [5] было предложено объяснение указанной анизотропии зарядового транспорта, учитывающее,

что движение носителей в динамических страйпах представляет собой высокочастотный (частота около 200 ГГц [6]) переменный ток, и, в результате, направления вдоль ( $\vec{H} \parallel [110]$ ) и поперек ( $\vec{H} \parallel [001]$ ) этих полос заряда оказываются выделенными во внешнем магнитном поле. Кроме того, согласно данным исследований оптической проводимости  $\text{LuV}_{12}$  [7] при  $T = 300$  К, более половины зонных носителей заряда в додекаборидах являются неравновесными и участвуют в формировании коллективных состояний (“переторможенные осцилляторы”). В такой ситуации следует ожидать значительной модификации магнитной фазовой диаграммы в антиферромагнитных (AF) металлах  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{V}_{12}$  с непрямым обменом через электроны проводимости (РККИ-механизм), а также понижения симметрии зарядового транспорта в AF-фазе. Учитывая вышеизложенное, в работе с целью определения анизотропии магнитной фазовой диаграммы и рассеяния носителей в AF-фазе для различных направлений магнитного поля при  $T_0 = 2.1$  К  $< T_N$  выполнено исследование магнетосопротивления однодоменного монокристаллического образца антиферромагнетика  $\text{Ho}_{0.5}\text{Lu}_{0.5}\text{V}_{12}$  с температурой Нееля  $T_N \approx 3.4$  К [8].

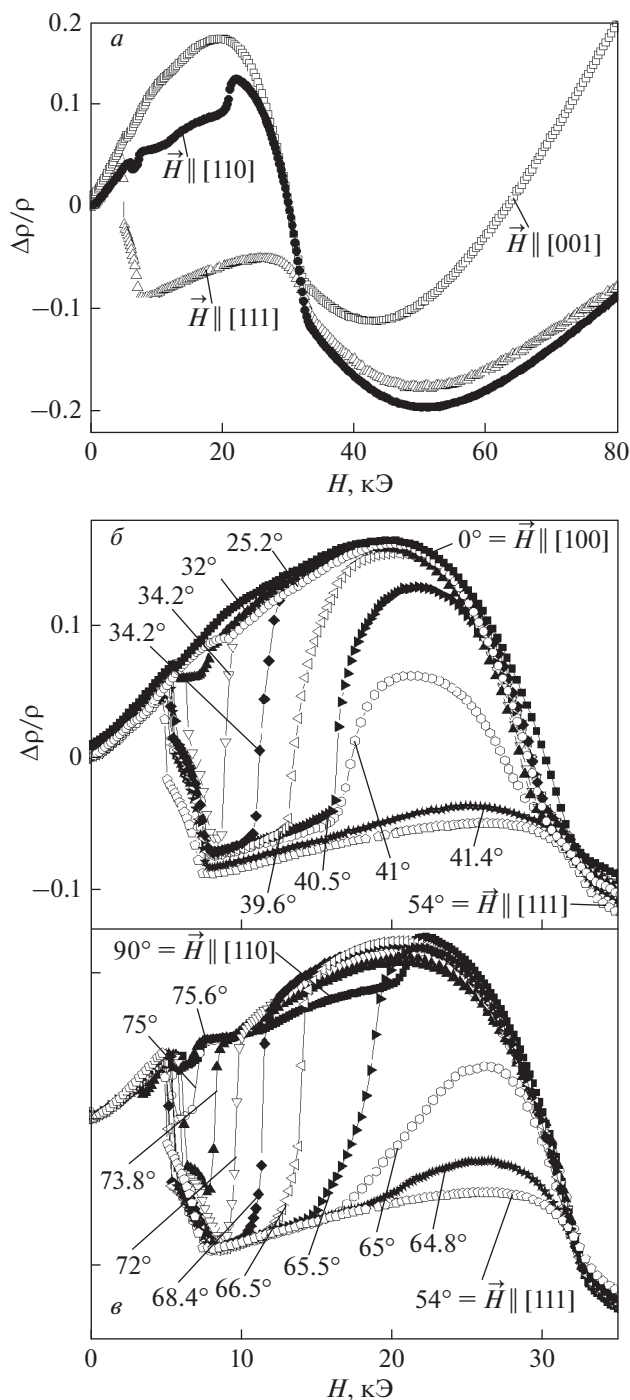


**Рис. 1.** Температурные зависимости: *a* – удельного сопротивления; *б* – магнитной восприимчивости; *в* – теплоемкости, измеренные в широкой окрестности магнитного фазового перехода при  $T_N \approx 3.4$  К. Полевые зависимости; *г* – теплоемкости  $C(H, T_0 = 2.1$  К); *д* – дифференциальной магнитной восприимчивости  $dM/dH = f(H, T_0 = 2.1$  К), полученные вдоль различных направлений  $\vec{H} \parallel [100]$ ,  $\vec{H} \parallel [110]$  и  $\vec{H} \parallel [111]$ . Стрелками отмечены положение перехода антиферромагнетик-парамагнетик в магнитном поле  $H_N \sim 30$  кЭ и ориентационные магнитные переходы в малых полях. На вставке к панели *д* показана схема измерений магнетосопротивления образца (см. текст).

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Прецизионные измерения поперечного магнетосопротивления  $\Delta\rho/\rho$  в АФ-фазе  $\text{Ho}_{0.5}\text{Lu}_{0.5}\text{B}_{12}$  при температуре  $T = 2.1$  К выполнены во внешнем магнитном поле до 80 кЭ для различных ориентаций вектора  $\vec{H}$  относительно главных кристаллографических направлений. В работе ис-

пользовалась измерительная ячейка, которая позволяет изменять угол  $\varphi = \vec{H} \wedge \vec{n}$  между нормалью  $\vec{n}$  к поверхности образца (110) и направлением внешнего поля  $\vec{H}$  в диапазоне  $\varphi = 0^\circ - 360^\circ$  с шагом  $\Delta\varphi = 1.8^\circ$  (см. вставку на рис. 1). Удельное сопротивление измерялось стандартным 4-хконтактным методом на постоянном токе с коммутацией при



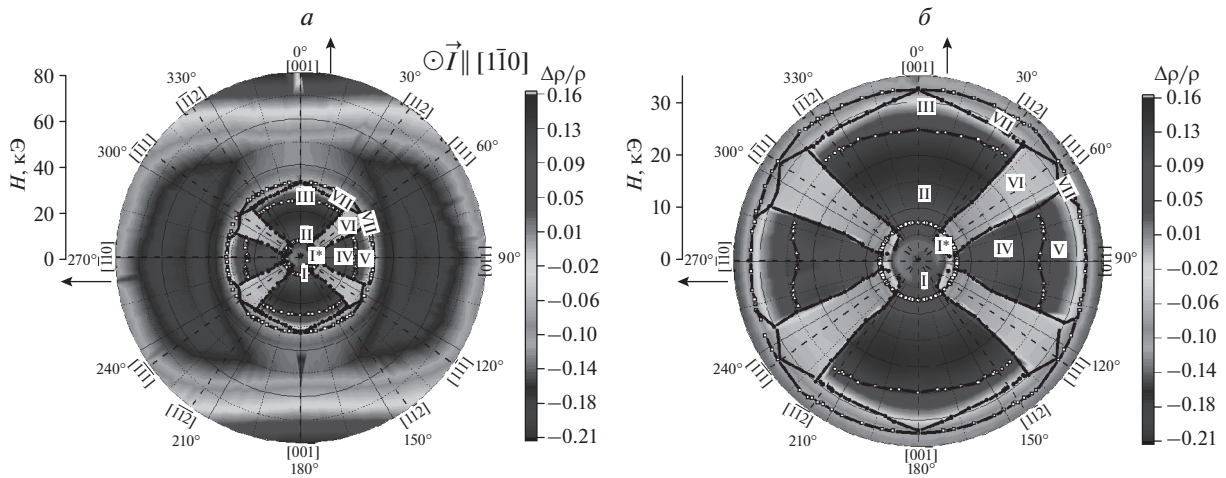
**Рис. 2.** Полевые зависимости магнетосопротивления  $\text{Ho}_{0.5}\text{Lu}_{0.5}\text{B}_{12}$  при температуре  $T = 2.1$  К: *a* – в направлении внешнего магнитного поля  $\vec{H} \parallel [100]$ ,  $\vec{H} \parallel [110]$  и  $\vec{H} \parallel [111]$ ; *b, c* – при отклонении поля  $\vec{H}$  на угол  $\varphi$  относительно нормали  $\vec{n}$  к плоскости образца (см. схему измерений на вставке к рис. 1*д*).

ориентации измерительного тока  $\vec{I} \parallel [1-10]$ . Для уточнения фазовых границ на  $H-\varphi-T_0$  диаграмме использовались также данные измере-

ний температурных (рис. 1*a–1в*) и полевых (рис. 1*г, 1д*) зависимостей намагниченности и теплоемкости, полученные при  $T_0 = 2.1$  К в магнитном поле  $\vec{H} \parallel [100]$ ,  $\vec{H} \parallel [110]$  и  $\vec{H} \parallel [111]$ , на установках MPMS-5 и PPMS-9 (Quantum Design), соответственно. Однодоменные монокристаллы  $\text{Ho}_{0.5}\text{Lu}_{0.5}\text{B}_{12}$  для измерений анизотропии, аналогичные исследовавшимся в [8] для направления  $\vec{H} \parallel [100]$ , были выращены методом вертикального индукционного бестигельного плавления в атмосфере инертного газа [9].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1*a–1в* приведены температурные зависимости удельного сопротивления, магнитной восприимчивости и теплоемкости соответственно, измеренные в широкой окрестности магнитного фазового перехода. Как видно из этих рис., вблизи  $T_N \approx 3.4$  К на всех кривых наблюдается резкая особенность, связанная с переходом в АФ-фазу. Измеренные в работе полевые зависимости теплоемкости  $C(H, T_0 = 2.1$  К) и дифференциальной магнитной восприимчивости  $dM/dH = f(H, T_0 = 2.1$  К) (см. рис. 1*г, 1д*, соответственно) позволяют установить при  $H_N \sim 30$  кЭ переход антиферромагнетик-парамагнетик в сильном магнитном поле вдоль различных направлений  $\vec{H} \parallel [100]$ ,  $\vec{H} \parallel [110]$  и  $\vec{H} \parallel [111]$ , а также обнаружить ориентационные магнитные переходы в интервале 5–15 кЭ. На рис. 2 представлены полевые кривые магнетосопротивления, измеренные при температуре 2.1 К. Как видно из рис. 2*a*, в сильных полях  $H > H_N$ , отвечающих парамагнитному состоянию  $\text{Ho}_{0.5}\text{Lu}_{0.5}\text{B}_{12}$ , наблюдается значительная анизотропия вклада в  $\Delta\rho/\rho$ , которая, согласно [5], связана с формированием вдоль [110] динамических зарядовых страйпов в матрице  $\text{RB}_{12}$ . В АФ-состоянии на кривых  $\Delta\rho/\rho$  регистрируется набор особенностей различной амплитуды, обусловленных ориентационными фазовыми переходами (см. рис. 2*б, 2в*), а вблизи 30 кЭ наблюдается переход антиферромагнетик–парамагнетик. Перестроение данных рис. 2 в полярных координатах с цветовой визуализацией амплитуды магнетосопротивления позволяет выявить характер анизотропии рассеяния носителей заряда и по особенностям на кривых  $\Delta\rho/\rho = f(H, \varphi, T_0)$  (рис. 2*б, 2в*) определить положение фазовых границ. На рис. 3*a, 3б*, соответственно, показаны общий вид анизотропии  $\Delta\rho/\rho$  в АФ и Р-фазах и круговая фазовая  $H-\varphi-T_0$ -диаграмма в АФ-состоянии исследуемого соединения. На рис. 3*б* показаны также фазовые границы, полученные нами из измерений намагниченности, теплоемкости (см. рис. 1*г, 1д*) и измерявшихся дополнительно угловых зависимостей магнетосопротивления  $\Delta\rho/\rho(\varphi, H_0, T_0 = 2.1$  К).



**Рис. 3.** *a* – Круговая фазовая диаграмма магнетосопротивления  $\text{Ho}_{0.5}\text{Lu}_{0.5}\text{V}_{12}$  при температуре  $T = 2.1$  К в полярных координатах  $H$ – $\varphi$ ; *b* – увеличенное изображение АФ-области диаграммы в полях  $H \leq 35$  кЭ. Римскими цифрами обозначены номера фаз в АФ-состоянии  $\text{Ho}_{0.5}\text{Lu}_{0.5}\text{V}_{12}$ . Горизонтальной и вертикальной стрелками, соответственно, показаны направления вдоль ( $\vec{H} \parallel \langle 110 \rangle$ ) и поперек ( $\vec{H} \parallel \langle 001 \rangle$ ) зарядовых страйпов (см. текст).

Как видно из рис. 3, круговая фазовая диаграмма антиферромагнетика  $\text{Ho}_{0.5}\text{Lu}_{0.5}\text{V}_{12}$  имеет вид “мальтийского креста”, причем в широкой окрестности направления поперек страйпов ( $\vec{H} \parallel \langle 001 \rangle$ ) наблюдаются наибольшие значения положительного магнетосопротивления. Сектор в окрестности направления вдоль страйпов ( $\vec{H} \parallel \langle 110 \rangle$ ) характеризуется уменьшенными относительно  $\vec{H} \parallel \langle 001 \rangle$  значениями  $\Delta\rho/\rho$ , тогда как в окрестности  $\vec{H} \parallel \langle 111 \rangle$  в магнитном поле выше 8 кЭ, напротив, наблюдается эффект отрицательного магнетосопротивления (см. рис. 2–3). Следует отметить, что вдоль указанных направлений регистрируются различающиеся между собой магнитоупорядоченные фазы (обозначены римскими цифрами на рис. 3б). Подчеркнем, что обусловленная присутствием динамических страйпов анизотропия зарядового транспорта в парамагнитной фазе ( $H > 35$  кЭ на рис. 2а, 3а) является определяющей, как при формировании круговой  $H$ – $\varphi$ – $T_0$  фазовой диаграммы антиферромагнетика  $\text{Ho}_{0.5}\text{Lu}_{0.5}\text{V}_{12}$ , так и для возникновения особенностей рассеяния носителей в магнитном поле.

**ВЫВОДЫ**

Показано, что в антиферромагнитном металле  $\text{Ho}_{0.5}\text{Lu}_{0.5}\text{V}_{12}$  с непрямым обменом между локализованными магнитными моментами ионов гольмия через электроны проводимости (РККИ-механизм) возникновение при низких температурах динамических зарядовых страйпов в матрице додекаборида приводит к формированию анизотропной фазовой диаграммы с большим разнооб-

разием магнитных фаз. Отмечено, что анизотропия зарядового транспорта в магнитном поле и расположение фазовых границ на  $H$ – $\varphi$  диаграмме АФ-состояния позволяют выделить три сектора, располагающиеся в окрестности трех основных направлений: *i* – вдоль страйпов ( $\vec{H} \parallel \langle 110 \rangle$ ); *ii* – поперек страйпов ( $\vec{H} \parallel \langle 001 \rangle$ ); *iii* – в направлении магнитной структуры ( $\vec{H} \parallel \langle 111 \rangle$ ).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-12-01426).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Dagotto E.* // Science. 2005. V. 309. P. 257.
2. *Слущанко Н.Е., Азаревич А.Н., Богач А.В. и др.* // ЖЭТФ. 2011. Т. 140. № 3. С. 536; *Sluchanko N.E., Azarevich A.N., Bogach A.V. et al.* // JETP. 2011. V. 113. P. 468.
3. *Sluchanko N., Bogach A., Bolotina N. et al.* // Phys. Rev. B. 2018. V. 97. Art. № 035150.
4. *Bolotina N.B., Dudka A.P., Khrykina O.N. et al.* // J. Phys. Cond. Mat. 2018. V. 30. Art. № 265402.
5. *Слущанко Н.Е., Хорошилов А.Л., Богач А.В. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 107. № 1. С. 35; *Sluchanko N.E., Khoroshilov A.L., Bogach A.V. et al.* // JETP Lett. 2018. V. 107. № 1. P. 30.
6. *Sluchanko N.E., Azarevich A.N., Bogach A.V. et al.* // J. Phys. Cond. Mat. 2019. V. 31. Art. № 065604.
7. *Gorshunov B.P., Zhukova E.S., Komandin G.A. et al.* // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 107. № 2. С. 108; *Gorshunov B.P., Zhukova E.S., Komandin G.A. et al.* // JETP Lett. 2018. V. 107. № 2. P. 100.
8. *Sluchanko N.E., Khoroshilov A.L., Anisimov M.A. et al.* // Phys. Rev. B. 2015. V. 91. Art. № 235104.
9. *Werheit H., Filipov V., Shirai K. et al.* // J. Phys. Cond. Mat. 2011. V. 23. Art. № 065403.