

Original article

In print article

<https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-40-05>

UDC: 53.092+538.911+538.945

PACS numbers: 74.25.Fy, 74.40.+k, 74.62.Fj

## ВПЛИВ ВИСОКОГО ТИСКУ НА ТЕМПЕРАТУРНУ ЗАЛЕЖНІСТЬ ПСЕВДОЩІЛИНИ МОНОКРИСТАЛІВ $Y_{0.66}Pr_{0.34}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

Г. Я. Хаджай<sup>1</sup> , В. Ф. Коршак<sup>1</sup> , С. В. Савич<sup>1</sup>, Джуны́ Ду<sup>1,2</sup>, Р. В. Вовк<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, 61022 Харків, Україна

<sup>2</sup>Школа математичних наук Лоянського педагогічного університету, 471934 Лоян, Китай

E-mail: [rvvovk2017@gmail.com](mailto:rvvovk2017@gmail.com)

Надійшла до редакції 17 квітня 2024 р. Переглянуто 22 травня 2024 р.

Прийнято до друку 25 травня 2024 р.

У роботі було досліджено вплив високого гідростатичного тиску на електричну провідність  $\sigma(T)$  у базисній  $ab$ -площині монокристалу високотемпературного надпровідника (ВТНП)  $Y_{0.66}Pr_{0.34}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ . Монокристал  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  вирощували за відомою розчин-розплавною технологією. Як початкові компоненти для вирощування монокристалу  $Y_{0.66}Pr_{0.34}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  використовували сполуки  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ ,  $CuO$  та  $Pr_2O_3$  у відповідному процентному співвідношенні. Режим вирощування та насичення киснем кристалу  $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  були такими ж, як і для нелегованих монокристалів. Електричний опір у  $ab$ -площині вимірювали за стандартною 4-контактною методикою. Гідростатичний тиск створювали у мультиплікаторі типу поршень-циліндр. Експериментально отримано температурні залежності питомого електричного опору  $\rho(T)$  досліджуваних монокристалів в  $ab$ -площині в інтервалі температур  $T_c$ –300 К за тисків 0–10 кбар. При всіх тисках, які були застосовані, експериментальні криві  $\rho(T)$  містять лінійні ділянки при температурах  $T > T^*$ . При температурах  $T < T^*$  криві  $\rho(T)$  відхиляються донизу від своєї лінійної екстраполяції, тобто у досліджених зразках виникає надлишкова провідність  $\Delta\sigma(T)$ . Встановлено, що  $\Delta\sigma(T)$  зразків у широкому інтервалі температур  $T_f < T < T^*$  характеризується експоненційною температурною залежністю  $\Delta\sigma \sim (1 - T/T^*) \exp(\Delta^*_{ab}/T)$ , де  $T^*$  – середньопольова температура надпровідного переходу, яка може бути інтерпретована в термінах теорії кросовера БКШ–БЕК. Користуючись цим співвідношенням, побудовано температурну залежність псевдощілини  $\Delta^*_{ab}(T)$  від  $T^*$  до температур, що відповідають максимальному значенню псевдощілини. Збільшення прикладеного тиску приводить до ефекту звуження температурного інтервалу реалізації псевдощілинного (ПЩ) режиму і, в результаті, до розширення інтервалу лінійної залежності питомого електричного опору у  $ab$ -площині. При збільшенні тиску температурна залежність псевдощілини демонструє кросовер від залежності типу БКШ до залежності типу БЕК.

**Ключові слова:** надлишкова провідність, допущання, монокристали  $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , високотемпературна надпровідність, кросовер, псевдощілинний стан.

**Як цитувати:** Г. Я. Хаджай, В. Ф. Коршак, С. В. Савич, Джуны́ Ду, Р. В. Вовк. Вплив високого тиску на температурну залежність псевдощілини монокристалів  $Y_{0.66}Pr_{0.34}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ . Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна. Серія «Фізика». Вип. 40, 2024, 47–51. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-40-05>

**In cites:** G. Ya. Hadzhai, V. F. Korshak, S. V. Savich, Junyi Du, R. V. Vovk. Effect of high pressure on temperature dependence of pseudogap in  $Y_{0.66}Pr_{0.34}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystals. Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Physics. Iss. 40, 2024, 47–51. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-40-05> (in Ukrainian).

## ВСТУП

Як відомо, допування сполуки  $\text{YBaCuO}$  елементами, що заміщують, викликає зміну густини носіїв струму, тепло- та електропровідності цього надпровідника. Водночас важливу роль відіграють тип та концентрація домішки. Особливий інтерес, у цьому аспекті, становить часткова заміна  $\text{Y}$  на  $\text{Pr}$ , яка, з одного боку, приводить до пригнічення надпровідності (на відміну від випадків заміни  $\text{Y}$  на решту рідкоземельних елементів) [1, 2], а з іншого – дозволяє зберігати практично незмінними параметри ґратки [3] та кисневий індекс  $\delta$  [2]. Зокрема, дослідження впливу домішок  $\text{Pr}$  на умови та режими існування області псевдоцілинного стану таких сполук [1] відіграє важливу роль не тільки для прояснення природи високотемпературної надпровідності, але й для визначення емпіричних шляхів підвищення їх критичних параметрів. Слід зазначити, що дотепер дані про ступінь впливу допування  $\text{Pr}$  на ПЩ-стан сполуки  $\text{YBaCuO}$  залишаються значною мірою суперечливими. Очевидно, певну роль тут відіграє той факт, що істотна частина експериментального матеріалу була отримана на керамічних, плівкових чи текстурованих зразках різної технологічної передісторії [1–3], що мають високий вміст міжгранулярних зв'язків. Як було показано в роботі [4], за достатньо високої точності вимірювань область псевдоцілини в широкому інтервалі температур можна визначити із залежностей  $\rho(T)$  (електроопір у базисній площині) при температурах, нижчих за деяке характерне значення  $T^*$  (температури відкриття псевдоцілини). У цій роботі було досліджено вплив домішок  $\text{Pr}$  ( $x \approx 0.34$ ) на температурну залежність псевдоцілини в монокристалах  $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  з різною критичною температурою ( $T_c$ ) в умовах прикладання високого гідростатичного тиску до 10 кбар.

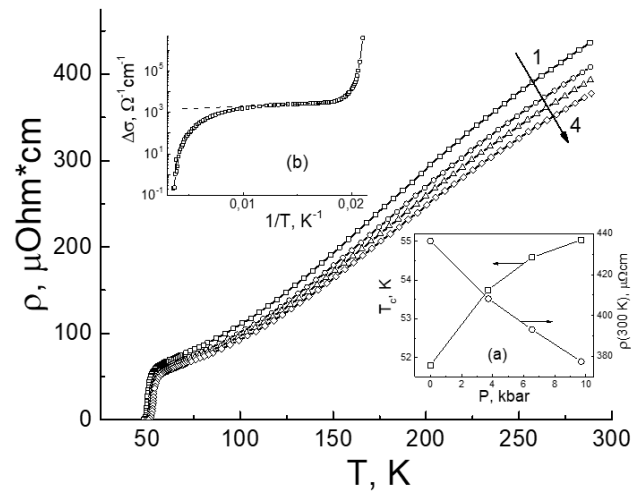
## МАТЕРІАЛИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ

Монокристали  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  вирощували за розчин-розплавною технологією [1]. Для отримання кристалів з частковою заміною  $\text{Y}$  на  $\text{Pr}$ ,  $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , у початкову шихту додавали  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  у відповідному процентному співвідношенні. Режимом вирощування і насичення киснем кристалів  $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  були такими ж, як і для нелегованих монокристалів [1]. Як початкові компоненти для вирощування кристалів використовували сполуки  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{CuO}$  і  $\text{Pr}_2\text{O}_3$ . Електроопір у  $ab$ -площині вимірювали за стандартною 4-контактною методикою шляхом нанесення срібної пасти на поверхню кристала з наступними приєднанням срібних провідників діаметром 0.05 мм і тригодинним відпадом при температурі 200 °С в

атмосфері кисню. Така процедура дозволяла отримати перехідний опір контактів менше одного Ома та проводити резистивні вимірювання при транспортних струмах до 10 мА в  $ab$ -площині. Гідростатичний тиск створювали у мультиплікаторі типу поршень-циліндр [1]. Величину тиску визначали за допомогою манганінового манометра, температуру – мідь-константанової термопари, вмонтованої у зовнішню поверхню камери на рівні положення зразка.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Температурні залежності питомого електроопору у  $ab$ -площині  $\rho(T)$  кристалів  $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  наведено на рис. 1.



**Рис. 1.** Температурні залежності питомого електричного опору в базисній площині  $\rho(T)$  монокристалу  $\text{Y}_{0.66}\text{Pr}_{0.34}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , виміряні за тисків: 0; 3.72; 6.53; 9.7 кбар – криві 1–4 відповідно. Вставка (а): баричні залежності  $T_c$  (квадрати) та  $\rho(300 \text{ K})$  (кола) монокристала  $\text{Y}_{0.66}\text{Pr}_{0.34}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . Вставка (б): температурна залежність надлишкової провідності  $\Delta\sigma(T)$  монокристала за атмосферного тиску.

**Fig. 1.** Temperature dependences of the resistivity in the base plane,  $\rho(T)$ , of the  $\text{Y}_{0.66}\text{Pr}_{0.34}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  single crystal, measured at pressures: 0; 3.72; 6.53; 9.7 kbar – curves 1–4, respectively. Inset (a): Baric dependences of  $T_c$  (squares) and  $\rho(300 \text{ K})$  (circles) of the  $\text{Y}_{0.66}\text{Pr}_{0.34}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  single crystal. Inset (b): Temperature dependence of the excess electrical conductivity  $\Delta\sigma(T)$  of this single crystal at atmospheric pressure.

Видно, що, в міру зростання прикладеного тиску, електроопір зразків зменшується, а критична температура зростає, що узгоджується з літературними

даними [2]. Водночас слід зазначити, що всім залежностям  $\rho(T)$  властива наявність ділянки з характерним термоактиваційним прогином.

Як видно з рис. 1, при зниженні температури менше певного характерного значення  $T^*$  відбувається відхилення  $\rho(T)$  від лінійної залежності, що свідчить про появу деякої надлишкової провідності, яка, як вже наголошувалося вище, зумовлена переходом до псевдощілинного режиму [1]. Водночас, у міру зростання прикладеного тиску, інтервал лінійної залежності  $\rho(T)$  істотно звужується, а температура  $T^*$  зміщується в область низьких температур. Це також свідчить про відповідне звуження температурного інтервалу існування надлишкової провідності.

Температурна залежність надлишкової провідності зазвичай визначається з рівності:

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0, \quad (1)$$

де  $\sigma_0 = \rho_0^{-1} = (A + BT)^{-1}$  – провідність, що визначається екстраполяцією лінійної ділянки у нульове значення температури, а  $\sigma = \rho^{-1}$  – експериментальне значення провідності у нормальному стані. Як показав аналіз, у достатньо широкому температурному інтервалі ці криві добре описуються експоненційною залежністю вигляду:

$$\Delta\sigma \sim \exp(\Delta^*_{ab}/T), \quad (2)$$

де  $\Delta^*_{ab}$  – величина, що визначає деякий термоактиваційний процес, пов'язаний з утворенням «псевдощілини».

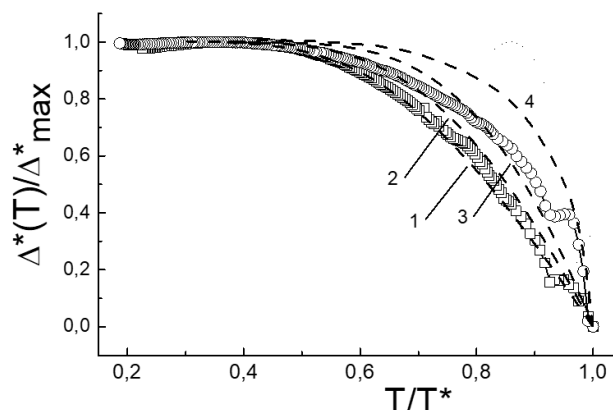
Експоненційна залежність  $\Delta\sigma(T)$  вже спостерігалася раніше на плівкових зразках  $YBaCuO$  [4]. Як було показано в [4], апроксимація експериментальних даних може бути істотно розширена за допомогою введення співмножника  $(1 - T/T^*)$ . У цьому випадку надлишкова провідність виявляється пропорційною густині надпровідних носіїв  $n_s \sim (1 - T/T^*)$  та обернено пропорційною числу пар,  $\sim \exp(-\Delta^*/kT)$ , зруйнованих тепловим рухом:

$$\Delta\sigma \sim (1 - T/T^*) \exp(\Delta^*_{ab}/T). \quad (3)$$

При цьому  $T^*$  розглядається як середньопольова температура надпровідного переходу, а температурний інтервал  $T_c < T < T^*$ , у якому існує псевдощілинний стан, визначається жорсткістю фази параметра порядку, що також залежить від дефіциту кисню або концентрації допуючого елемента. Таким

чином, використовуючи методику, запропоновану в [4], за експериментальною кривою  $\ln\Delta\sigma$  можна побудувати температурну залежність  $\Delta^*_{ab}(T)$  безпосередньо до  $T^*$ .

На рис. 2 показано температурні залежності псевдощілини у зведених координатах  $\Delta^*(T)/\Delta^*_{\max} - T/T^*$  ( $\Delta^*_{\max}$  – значення  $\Delta^*$  на плато оддалік  $T^*$ ) за тисків 0 кбар та 9.7 кбар. Пунктирними лініями показано залежності  $\Delta^*(T)/\Delta(0)$  від  $T/T^*$ , розраховані згідно з [5] для значень параметра кросовера  $\mu/\Delta(0) = 10$  (межа БКШ),  $-2, -5, -10$  (межа БЕК).



**Рис. 2.** Температурні залежності псевдощілини кристалу у зведених координатах  $\Delta^*(T)/\Delta^*_{\max} - T/T^*$  ( $\Delta^*_{\max}$  – значення  $\Delta^*$  на плато оддалік  $T^*$ ) за тисків 0 кбар (квадрати) та 9.7 кбар (кола). Пунктирними лініями показано залежності  $\Delta^*(T)/\Delta(0)$  від  $T/T^*$ , розраховані згідно з [5] для значень параметра кросовера  $\mu/\Delta(0) = 10$  (межа БКШ),  $-2, -5, -10$  (межа БЕК).

**Fig. 2.** Temperature dependences of the crystal pseudogap in the relative coordinates  $\Delta^*(T)/\Delta^*_{\max} - T/T^*$  ( $\Delta^*_{\max}$  – the value of  $\Delta^*$  on the plateau far from  $T^*$ ) at pressures of 0 kbar (squares) and 9.7 kbar (circles). Dotted lines show the dependences of  $\Delta^*(T)/\Delta(0)$  on  $T/T^*$ , calculated according to [5] for the values of the crossover parameter  $\mu/\Delta(0) = 10$  (BCS limit),  $-2, -5, -10$  (BEC limit).

Температурні залежності псевдощілини були раніше одержані в роботі [5] в рамках теорії кросовера БКШ–БЕК. У загальному вигляді ці залежності описуються рівнянням:

$$\Delta(T) = \Delta(0) - \Delta(0) \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\frac{T}{\Delta(0)}} \times \exp\left[-\frac{\Delta(0)}{T}\right] \left[1 + \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{x_0^2 + 1}{T/\Delta(0)}}\right)\right] \quad (4)$$

де  $x_0 = \mu/\Delta(0)$  ( $\mu$  – хімпотенціал системи носіїв;  $\Delta(0)$  – величина енергетичної щілини при  $T = 0$ ), а  $\operatorname{erf}(x)$  – функція похибок.

У граничному випадку  $x_0 \rightarrow \infty$  (слабкого спаровування) аналітичний вираз (4) набуває вигляду:

$$\Delta(T) = \Delta(0) - \Delta(0)\sqrt{2\pi\Delta(0)T} \exp\left[-\frac{\Delta(0)}{T}\right], \quad (5)$$

добре відомого у теорії БКШ. Водночас для межі сильних взаємодій у 3-вимірному випадку ( $x_0 < -1$ ) формула (4) переходить у:

$$\Delta(T) = \Delta(0) - \frac{8}{\sqrt{\pi}} \sqrt{-x_0} \left(\frac{\Delta(0)}{T}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left[-\frac{\sqrt{\mu^2 + \Delta^2(0)}}{T}\right]. \quad (6)$$

Залежності  $\Delta^*(T)/\Delta(0)$  від  $T/T^*$ , розраховані згідно з (6) для значень параметра кросовера  $\mu/\Delta(0) = 10$  (межа БКШ),  $-2$ ,  $-5$ ,  $-10$  (межа БЕК), показано на рис. 2 пунктирними лініями. Видно, що, у міру зростання величини прикладеного тиску, відбувається зміщення експериментальних кривих від залежностей вигляду (6) до (5). Така поведінка виявляється якісно подібною до ефекту трансформації температурних залежностей псевдощілини зразків  $\text{YBaCuO}$ , що спостерігається при зниженні ступеня кисневої нестехіометрії [1]. Очевидно, що згадані кореляції в поведінці кривих  $\Delta^*(T)$  не є випадковими. Дійсно, як добре відомо з літератури (див., наприклад, [1]), прикладання високого тиску до зразків ВТНП-системи 1-2-3, рівно як і зменшення вмісту кисню, приводить до поліпшення провідних характеристик, яке виражається у збільшенні абсолютної величини  $T_c$  та істотному зниженні питомого електроопору. Таким чином, враховуючи деяку умовність визначення величини температури відкриття псевдощілини  $T^*$  по відхиленню залежності  $\rho(T)$  від лінійної, узгодження експерименту з теорією в нашому випадку можна вважати цілком задовільним.

## ВИСНОВКИ

Результати проведеного дослідження свідчать про таке.

Прикладання високого тиску до монокристалів  $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ( $x \approx 0.34$ ) приводить до істотного розширення інтервалу лінійної залежності  $\Delta^*_{ab}(T)$  та звуження температурної ділянки реалізації псевдощілинного режиму.

Надлишкова провідність  $\Delta\sigma(T)$  монокристалів  $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  у широкому інтервалі температур  $T_f < T < T^*$  характеризується експоненційною температурною залежністю, а температура

залежність псевдощілини задовільно описується в рамках теорії кросовера БКШ–БЕК.

## КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

## CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interests.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. R. V. Vovk, A. L. Solovyov. Low Temp. Phys., 44, 81 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5020905>
2. M. Akhavan. Physica B, 321, 265 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(02\)00860-8](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(02)00860-8)
3. A. I. Chronos, I. L. Goulatis and R. V. Vovk. Acta Chim. Slov., 54, 179 (2007).
4. Д. Д. Прокоф'єв, М. П. Волков, Ю. А. Бойков. ФТТ, 45, 7, 1168 (2003).
5. E. Babaev, H. Kleinert. Phys. Rev. B., 59, 12083 (1999). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.59.12083>

## REFERENCES

1. R. V. Vovk, A. L. Solovyov. Low Temp. Phys., 44, 81 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5020905>
2. M. Akhavan. Physica B, 321, 265 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(02\)00860-8](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(02)00860-8)
3. A. I. Chronos, I. L. Goulatis and R. V. Vovk. Acta Chim. Slov., 54, 179 (2007).
4. D. D. Prokof'ev, M. P. Volkov, Yu. A. Boykov. Physics of the Solid State, 45, 7, 1168 (2003) (in Russian).
5. E. Babaev, H. Kleinert. Phys. Rev. B., 59, 12083 (1999). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.59.12083>

## EFFECT OF HIGH PRESSURE ON TEMPERATURE DEPENDENCE OF PSEUDOGAP IN $Y_{0.66}Pr_{0.34}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ SINGLE CRYSTALS

G. Ya. Hadzhai<sup>1</sup>, V. F. Korshak<sup>1</sup>, S. V. Savich<sup>1</sup>, Junyi Du<sup>1,2</sup>, R. V. Vovk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., 61022 Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>School of Mathematical Sciences, Luoyang Normal University, 471934 Luoyang, China

E-mail: [rvvovk2017@gmail.com](mailto:rvvovk2017@gmail.com)

Received on April 17, 2024. Reviewed on May 22, 2024.

Accepted for publication on May 25, 2024.

The paper investigates the effect of high hydrostatic pressure on the conductivity,  $\sigma(T)$ , in the basic  $ab$ -plane of the HTSC single crystal  $Y_{0.66}Pr_{0.34}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ . The  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystal was grown using the well-known solution-melt technology.  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ ,  $CuO$  and  $Pr_2O_3$  compounds were used in the appropriate percentage ratio as initial components for growing  $Y_{0.66}Pr_{0.34}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystal. The modes of growth and oxygen saturation of the  $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  crystal were the same as for undoped single crystals. Electrical resistance in the  $ab$ -plane was measured according to the standard 4-pin method. Hydrostatic pressure was created in a piston-cylinder multiplier. The temperature dependences of the specific electrical resistance,  $\rho(T)$ , of the studied single crystals in the  $ab$ -plane in the temperature range  $T_c$ –300 K at pressures of 0–10 kbar were obtained experimentally. At all applied pressures, the experimental curves  $\rho(T)$  contain linear sections at temperatures  $T > T^*$ . When  $T < T^*$ , the  $\rho(T)$  curves deviate downward from their linear extrapolation, i.e., excess conductivity,  $\Delta\sigma(T)$ , appears in the studied samples. It was established that  $\Delta\sigma(T)$  of the samples in a wide temperature range  $T_f < T < T^*$  are characterized by an exponential temperature dependence  $\Delta\sigma \sim (1 - T/T^*)\exp(\Delta^*_{ab}/T)$ , where  $T^*$  is the mean-field temperature of the superconducting transition, and can be interpreted in terms of the BCS-BEC crossover theory. Using this ratio, the temperature dependence of the pseudogap,  $\Delta^*_{ab}(T)$ , from  $T^*$  to the temperatures corresponding to the maximum value of the pseudogap was constructed. An increase in the applied pressure leads to the effect of narrowing the temperature interval of realization of the pseudogap (PG) mode and, as a result, to the expansion of the interval of the linear dependence of the specific electrical resistance in the  $ab$ -plane. As the pressure increases, the temperature dependence of the pseudogap shows a crossover from the dependence of the BCS type to the dependence of the BEK type.

**Keywords:** excess conductivity, doping,  $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystals, high temperature superconductivity, crossover, pseudogap state.