

Original article














In print article

<https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-38-01>

UDC 539.374+669.715

PACS numbers: 74.72.-h

## ЕВОЛЮЦІЯ ФЛУКТУАЦІЙНОЇ ПРОВІДНОСТІ МОНОКРИСТАЛІВ $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\Delta}$ ПІД ВПЛИВОМ СЕРЕДНІХ ДОЗ ОПРОМІНЕННЯ ЕЛЕКТРОНАМИ ТА ДОПУВАННЯ ПРАЗЕОДИМОМ

М.О. Азаренков<sup>1,2</sup> , Г.Я. Хаджай<sup>1</sup> , А.В. Мацепулін<sup>1</sup> ,  
М.В. Коробков<sup>1</sup> , А.О. Комісаров<sup>1</sup> , А.І. Русалович<sup>1,3</sup> , Junyi Du<sup>1,4</sup> ,  
С.М. Камчатна<sup>1,3</sup> , О.Ю. Врагов<sup>1</sup> , Л.О. Пащенко<sup>1</sup> , В.Ю. Гресь<sup>1</sup> ,  
Е.С. Геворкян<sup>1,3,5</sup> , Р.В. Вовк<sup>1,3</sup> 

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

<sup>2</sup>Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій  
НАН України, 61108, вул. Академічна 1, м. Харків, Україна

<sup>3</sup>Український державний університет залізничного транспорту, 61050, площа Фейєрбаха, 7, Харків, Україна.

<sup>4</sup>Школа математичних наук Лоянського педагогічного університету, Лоян 471934, Китай

<sup>5</sup>Технологічний і гуманітарний університет імені Казімежа Пуласького в Радомі,  
вулиця Stasieckiego 544, 26-600 Радом, Польща.

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

Надійшла до редакції 21 квітня 2023 р. Переглянуто 03 червня 2023 р.

Прийнято до друку 12 червня 2023 р.

Досліджено вплив середніх доз (від  $10^{19}$  см<sup>-2</sup> до  $10^{20}$  см<sup>-2</sup>) опромінення швидкими електронами та зміни концентрації празеодиму в інтервалі  $0.0 \leq z \leq 0.5$  на надлишкову провідність оптимально допованих киснем монокристалів  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ . Показано, що опромінення електронами та збільшення ступеня допування празеодимом приводить до значного розширення температурного інтервалу існування надлишкової провідності, тим самим звужуючи область лінійної залежності  $\rho(T)$  у аб-площині. Встановлено, що при дозах  $0 \leq D \leq 6.5 \times 10^{19}$  см<sup>-2</sup> значення величини поперечної довжини когерентності  $\xi_c(0)$  збільшується зі зростанням  $D$  приблизно в 3 рази та більш ніж у чотири рази у міру підвищення вмісту празеодиму у зразку до  $z \approx 0.42$ . При цьому в обох випадках зсувається за температурою 2D-3D точка кросовера. На відміну від випадку опромінення малими дозами ( $D \leq 10^{19}$  см<sup>-2</sup>) та допування празеодимом до концентрацій  $z \leq 0.39$ , опромінення середніми дозами та допування празеодимом при більш високих концентраціях призводить до немонотонної залежності поперечної довжини когерентності  $\xi_c(0)$  з характерними максимумами при  $D \sim (7-8) \times 10^{19}$  см<sup>-2</sup> та  $z \approx 0.42$ , що може бути пов'язане із загальним пригніченням надпровідних характеристик.

**Ключові слова:** монокристали  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ , надмірна провідність, опромінення, швидкі електрони, 2D-3D кросовер.

**Як цитувати:** М.О. Азаренков, Г.Я. Хаджай, А.В. Мацепулін, М.В. Коробков, А.О. Комісаров, А.І. Русалович, Junyi Du, С.М. Камчатна, О.Ю. Врагов, Л.О. Пащенко, В.Ю. Гресь, Е.С. Геворкян, Р.В. Вовк. Еволюція флуктуаційної провідності монокристалів  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  під впливом середніх доз опромінення електронами та допування празеодимом. Вісник ХНУ імені В.Н. Каразіна, серія «Фізика», вип. 38, 2023; 7-14. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-38-01>

**In cites:** M.O. Azarenkov, G.Ya. Khadzhai, A.V. Matsepulin, M.V. Korobkov, A.O. Komisarov, A.I. Rusalovich, Junyi Du, S.M. Kamchatnaya, A.Yu. Vragov, L.O. Pashchenko, V.Yu. Gres, E.S. Gevorkyan, R.V. Vovk. Evolution of fluctuation conductivity of  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystals under the influence of medium doses of electron irradiation and doping with praseodymium. The journal of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Physics" Iss. 38, 2023; 7-14. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-38-01> (In Ukrainian).

## ВСТУП

Відомо, що сполуки  $RBa_2Cu_3O_7$  ( $R = Y$  та інші рідкоземельні елементи) є технологічно важливими структурами для отримання новітніх перспективних матеріалів з високою струмонесучою здатністю, забезпечення компонентів для виготовлення осередків пам'яті, надчутливих елементів зчитування і надшвидкісних ліній зв'язку на основі ВТНП. Характерною особливістю ВТНП-купратів є наявність широкої ділянки надлишкової провідності ( $\Delta\sigma$ ) на температурних залежностях електроопору  $\rho(T)$  [1-11]. Відповідно до сучасних уявлень [1, 11] при температурах  $T^* > T \gg T_c$   $\Delta\sigma$  обумовлена проявом так званої псевдоцилінної (ПЦ)-аномалії. При температурах поблизу критичної  $T \geq T_c$  визначається механізми флуктуаційного парування носіїв (ФП), детально описаних у класичних роботах [12-14]. Важливу роль при цьому відіграє склад та топологія дефектного ансамблю [1, 2, 15], що визначає умови протікання транспортного струму та механізми розсіювання носіїв. При цьому серед експериментальних методик, що дозволяють контрольованим способом змінювати склад та морфологію дефектного ансамблю у ВТНП-матеріалах необхідно особливо виділити метод радіаційного впливу [16, 17] та допування празеодимом [18, 19]. Ці методи мають певні переваги в порівнянні з іншими методами введення в надпровідник дефектів, такі як збереження стехіометричного складу речовини та середньої кількості електронів на атом, можливість збереження макрооднорідності зразків та контрольована зміна концентрації радіаційних та домішкових дефектів [19, 20]. Вивчення впливу радіаційних ефектів на ФП у ВТНП-купратах є принципово важливим з двох точок зору: розуміння мікроскопічної природи високотемпературної надпровідності [21, 22], яка залишається нез'ясованою, незважаючи на 36 років інтенсивних досліджень, та покращення надпровідних властивостей цих сполук для їх практичних застосувань [23]. Слід зазначити, що, незважаючи на досить великий експериментальний матеріал, накопичений до теперішнього часу [1-10, 15-20], питання впливу радіаційного опромінення на різні режими провідності і, зокрема, флуктуаційної провідності ВТНП-сполук залишається досі остаточно не з'ясованим. Очевидно, певну роль тут відіграє той факт, що основна кількість наявних експериментальних даних була отримана на текстурованих [24] та керамічних [1] зразках з високим вмістом міжгранулярних зв'язків, а також плівках [25], осаджених на підкладках різного виду за допомогою доволі відмінних технологічних процесів.

Відомо, що критична температура ( $T_c$ ) сполук  $RBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  ( $R = Y$  та інші рідкоземельні елементи),

оптимально допованих киснем, становить  $T_c \approx 90$  К і слабо залежить від природи  $R$ . При цьому  $CeBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  і  $TbBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  не утворюють ОРТО-структуру [26],  $PmBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  є радіоактивним, а  $PrBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  не надпровідить («аномалія празеодима»), незважаючи на наявність орторомбічного елементарного осередку [26]. Особливий інтерес у цьому аспекті представляють сполуки з частковою заміною  $Y$  на  $Pr$ , що, з одного боку, приводить до часткового пригнічення надпровідності, а з іншого – дозволяє зберігати практично незмінними параметри решітки та кисневий індекс сполуки. Зокрема, дослідження впливу опромінення і домішок  $Pr$  на умови та режими реалізації флуктуаційної провідності у таких сполуках [19, 20] відіграє важливу роль не тільки для прояснення природи високотемпературної надпровідності, але й для визначення емпіричних шляхів підвищення критичних параметрів ВТНП-сполук.

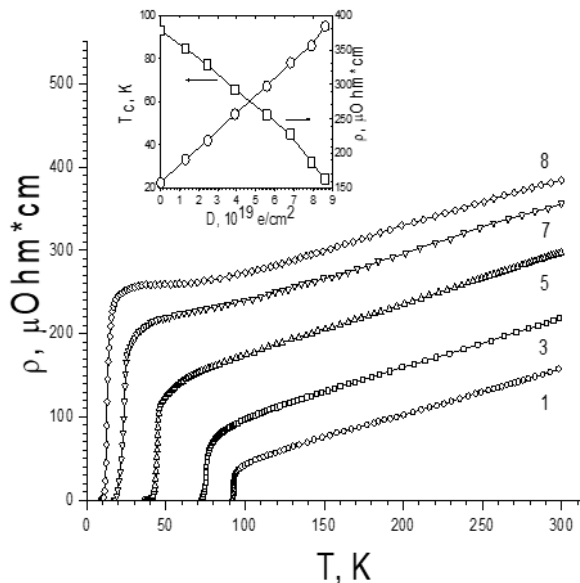
## МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

У циклі наших попередніх робіт [27-31] було досліджено вплив малих доз  $D$  від  $1.4 \times 10^{18}$   $cm^{-2}$  до  $8.8 \times 10^{18}$   $cm^{-2}$  і слабого допування празеодимом на ФП та надлишкову провідність у монокристалах  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  стехіометричного складу. У цій роботі представлені результати дослідження впливу середніх доз (до  $100 \times 10^{18}$   $cm^{-2}$ ) опромінення високоенергетичними електронами та вплив домішок  $Pr$  у широкому інтервалі концентрацій ( $0.0 \leq z \leq 0.5$ ) на флуктуаційну провідність у монокристалах  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  при протіканні транспортного струму в базисній аб-площині.

Досліджувані у цій роботі монокристали  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  були вирощені шляхом розплав-розчин у золотому тиглі [1, 3, 5]. Кристали насичували киснем в атмосфері кисню за  $430^\circ C$  протягом чотирьох днів. Всі досліджені кристали були здвійникові, а двійникові площини мали блокову будову. Опір вимірювали стандартним 4-контактним методом. Відповідні розміри кристалів цих вимірювань складали  $(1.5...2) \times (0.2...0.3) \times (0.01...0.02)$   $mm^3$ , де найменший розмір відповідав осі  $c$ . Для отримання кристалів з частковою заміною  $Y$  на  $Pr$ ,  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , початкову шихту додавали  $Pr_5O_{11}$  у відповідному відсотковому співвідношенні. Режими вирощування та насичення киснем кристалів  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  були такими ж, як і для нелегованих монокристалів [19, 20]. Як початкові компоненти для вирощування кристалів використовували сполуки  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ ,  $CuO$  та  $Pr_5O_{11}$ .

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Транспортний струм до 10 мА пропускали за найбільшим розміром зразка, відстань між потенційними контактами становила 1 мм. Технологія



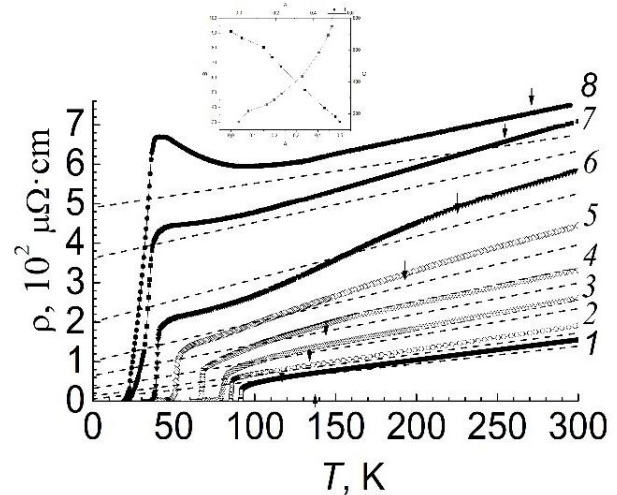
**Рис. 1.** Температурні залежності електричного опору  $\rho_{ab}(T)$  монокристалу  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  до та після електронного опромінення дозами (0, 24.7, 55.7, 79.2, 86.3) $\times 10^{18} \text{ см}^{-2}$  – криві 1, 3, 5, 7, 8 відповідно.

**Fig. 1.** Temperature dependences of the electrical resistance  $\rho_{ab}(T)$  of the  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystal before and after electronic training with doses (0, 24.7, 55.7, 79.2, 86.3) $\times 10^{18} \text{ см}^{-2}$  – curves 1, 3, 5, 7, 8 respectively.

отримання експериментальних зразків та проведення резистивних вимірювань, а також аналіз транспортних властивостей зразків у нормальному та надпровідному станах докладно описані у [1, 3, 5, 19, 20]. Опромінення електронами з енергіями 0.5 ... 2.5 MeV проводили при температурах  $T < 10 \text{ K}$ . Дозі опромінення  $\phi = 10^{18} \text{ см}^{-2}$  електронами з енергією 2.5 MeV відповідає усереднена по всіх підтратках концентрація дефектів  $10^{-4}$  зміщ./ат. [16, 32]. Послідовність вимірювань була наступною. Спочатку вимірювали температурні залежності опору зразків до опромінення. Потім знижували температуру до 5 K проводили опромінення. Інтенсивність пучка була такою, що температура зразка у процесі опромінення не перевищувала 10 K.

Після опромінення зразка дозою його нагрівали до температури 300 K і, поступово знижуючи температуру зразка, проводили вимірювання температурних залежностей опору при  $T < 300 \text{ K}$ . Спеціально сконструйований гелієвий кріостат

дозволяв проводити вимірювання опору після опромінення в інтервалі температур  $4.2 < T < 300 \text{ K}$ . Всі вимірювання електроопору проводили за фіксованої температури. Температуру вимірювали платиновим термометром опору, а стабільність температури становила близько 5 мК.



**Рис. 2.** Температурні залежності надлишкової провідності  $\rho_{ab}(T)$  монокристалів  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  для  $z = 0.0, 0.05, 0.19, 0.23, 0.34, 0.43, 0.48, 0.5$  – криві 1-8 відповідно.

**Fig. 2.** Temperature dependences of excess conductivity  $\rho_{ab}(T)$  of  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystals for  $z = 0.0, 0.05, 0.19, 0.23, 0.34, 0.43, 0.48, 0.5$  – curves 1-8 respectively.

На рис. 1. представлені залежності  $\rho_{ab}(T)$ , отримані до і після опромінення швидкими електронами при дозах до  $100 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ . Частину кривих на рис. 1 не показано, щоб не ускладнювати загальну картину. Детально криві цих залежностей аналізуються нами у [33]. Як видно з рис. 2 всі криві характеризуються квазіметалевою поведінкою з характерною лінійною ділянкою залежності при високих температурах. У той же час при максимальних дозах криві починають набувати характерної S-подібної форми, що свідчить про появу на залежностях  $\rho_{ab}(T)$  термоактиваційної ділянки, про що докладніше буде сказано нижче.

Стрілки показують температури переходу в псевдоцилінний режим  $T^*$ . Пунктирними лініями зображено екстраполяцію лінійної ділянки в нульове значення температури. На вставках показані дозові та концентраційні залежності критичної температури  $T_c$  (квадрати) та електроопору при кімнатній температурі  $\rho_{300}$  (кілця) для цих зразків.

У той же час існують деякі відмінності в еволюції характеру поведінки кривих при радіаційному впливі

та допуванні празеодимом. Як видно з рис. 1, радіаційний вплив приводить до аномально сильного (порівняно зі зміною складу [1, 34]) пригнічення надпровідності (зменшення  $T_c$ ) у високотемпературному надпровіднику  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . Однак, характер зміни електричних та надпровідних властивостей ВТНП при зміні складу [34] та під дією опромінення дещо різний. Основна відмінність полягає в наступному: у той час як при зміні складу зниження  $T_c$  до 86 К, як правило, супроводжується зміною виду кривих  $\rho(T)$  від металевого до, так званої, «S-подібної кривої» з характерним термоактиваційним прогином [1, 34], при опроміненні таке ж, за абсолютною величиною, зниження  $T_c$  при помітному зростанні в інтервалі температур  $T_c - 300$  К не супроводжується появою S-подібної залежності  $\rho(T)$ . Термоактиваційна поведінка електроопору у опроміненних зразків проявляється лише за досить низьких значеннях  $T_c$  [33]).

Однією з причин, що приводять до сильного зниження  $T_c$  опроміненних зразків, може бути виникнення, під дією опромінення, діелектричних включень, обумовлених перерозподілом кисню між позиціями (4) і О (5) і утворенням локальних областей з тетрагональною структурою.

З підвищенням дози критична температура  $T_c$  зменшується від  $\sim 92$  К до  $\sim 24$  К, а  $\rho_{ab}(T)$  збільшується від  $\rho \sim 158 \mu\text{Ohm.cm}$  до  $\sim 384 \mu\text{Ohm.cm}$ , відповідно, що узгоджується з літературними даними [35, 36]. Якісно подібні залежності спостерігаються при допуванні празеодимом [1, 18]. Дозові та концентраційні залежності,  $T_c(D, z)$  та  $\rho_{300}(D, z)$ , представлені на вставках до рис. 1 та рис. 2.

Як впливає з рис. 1 та рис. 2, при зниженні температури  $T$  нижче деякого характерного рівня,  $T^*$  відбувається відхилення кривих від лінійної залежності, що свідчить про появу, так званої, надлишкової провідності,  $\Delta\sigma$ , температурну залежність якої можна отримати за формулою:  $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_{lin}$ , де  $\sigma = \rho_{ab}^{-1}$  – експериментальне значення провідності у нормальному стані при  $T < T^*$ , а  $\sigma_{lin} = (\rho_{lin}^{-1}) = (AT)^{-1}$ .

Як уже зазначалося вище, поблизу  $T_c$  згідно з існуючими уявленнями [1, 12-15] для випадку 2D і 3D флуктуацій  $\Delta\sigma$  у полікристалічних системах може бути описана виразами:

$$\Delta\sigma_{2D} = 1/4 \left\{ \frac{e^2}{16 \hbar d} \varepsilon^{-1} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{8\xi_c^4(0)}{d^2 \xi_{ab}^2(0)} \varepsilon^{-1} \right)^{1/2} \right] \right\},$$

$$\Delta\sigma_{3D} = \frac{e^2}{32 \hbar \xi_p(0)} \varepsilon^{-1/2}, \quad (1)$$

де  $\xi_c$  і  $\xi_{ab}$  – довжини когерентності впоперек та вздовж базисної площини,  $d$  – міжплощинна відстань,  $\varepsilon = (T -$

$T_c)/T_c$  – наведена температура, а  $\xi_p(0)$  – ефективна характеристична довжина когерентності при  $T = 0$ , яка дається формулою:

$$1/\xi_p(0) = 1/4 [1/\xi_c^2(0) + (1/\xi_c^2(0) + 8/\xi_{ab}^2(0))]^{1/2}. \quad (2)$$

Як було показано в [37], у разі монокристалічних зразків  $\Delta\sigma$  визначається класичним рівнянням АЛ [12]:  $\Delta\sigma = C\varepsilon^\alpha$ , де

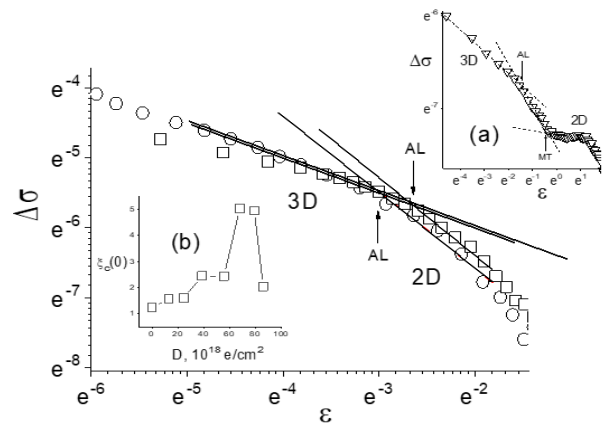
$$C = \frac{e^2}{32 \hbar \xi_c(0)} \quad \text{і } \alpha = -0.5 \text{ для 3D, (поблизу } T_c, \text{ при } \xi_c \gg d$$

$d$  – взаємодія між флуктуаційними надпровідними парами реалізується у всьому об'ємі надпровідника) (3)

$$\frac{e^2}{16 \hbar d} \quad \text{і } \alpha = -1 \text{ для 2D, (оддалік від } T_c, \text{ при } \xi_c \ll d$$

– взаємодія можлива тільки в площинах провідних шарів)

На рис. 3 та рис. 4 представлені температурні залежності  $\Delta\sigma(T)$  у координатах  $\ln\Delta\sigma(\ln\varepsilon)$ . Видно, що в області температур між  $T_c$  і  $\leq 1.1T_c$  (залежно від вмісту кисню) ці залежності задовільно апроксимуються прямими з кутом нахилу  $\alpha_1 \approx -0.5$ , що свідчить про тривимірний характер флуктуаційної надпровідності у цьому температурному інтервалі. При подальшому підвищенні температури швидкість зменшення  $\Delta\sigma$  суттєво зростає ( $\alpha_2 \approx -1$ ), що, своєю чергою, можна як вказівку зміну розмірності ФП.



**Рис. 3.** Залежності  $\Delta\sigma(T)$  у координатах  $\ln\Delta\sigma(\ln\varepsilon)$  для доз 0 (кілця) та  $55.7 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$  (квадрати) та  $79.2 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$  (вставка (а)). На вставці (b) показано залежність  $\xi_c(0)$  від дози опромінення  $D$ .

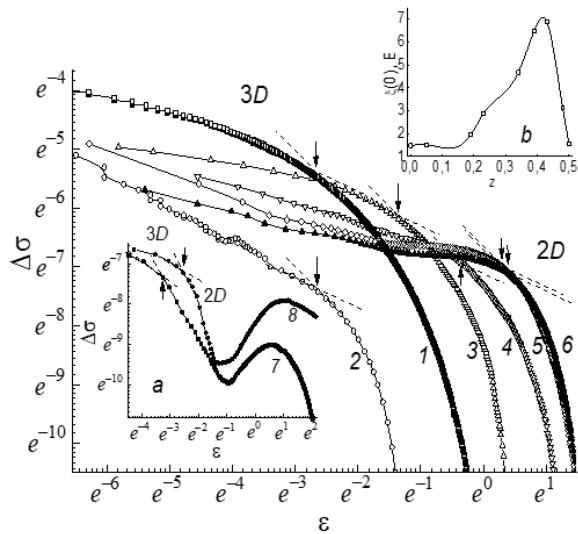
**Fig 3.** Dependencies of  $\Delta\sigma(T)$  in coordinates  $\ln\Delta\sigma(\ln\varepsilon)$  for doses 0 (rings) and  $55.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$  (squares) and  $79.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$  (inset (a)). The inset (b) shows the dependence of  $\xi_c(0)$  on the radiation dose  $D$ .

Слід зазначити, що для залежностей  $\ln\Delta\sigma(\ln\varepsilon)$ , отриманих при опроміненні максимальними дозами  $D = 7.92 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$  та  $8.63 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$ , спостерігається

немонотонна поведінка кривих, що характеризується додатковим кросовером при температурах  $\varepsilon \geq \varepsilon_0$  з різким зменшенням величини кута нахилу  $\alpha$ . Така особливість вже спостерігалася раніше у роботі [38] і може свідчити про присутність у системі переходу до так званого режиму Макі-Томпсона [14] поведінки температурних залежностей надмірної провідності  $\Delta\sigma$ . З огляду на обмежений характер цієї роботи ми залишаємо докладніший аналіз цих особливостей для розширеного повідомлення.

Як слідує з (3), в точці 2D-3D кросовера:

$$\varepsilon_0 = 4[\xi_c(0)/d]^2. \quad (4)$$



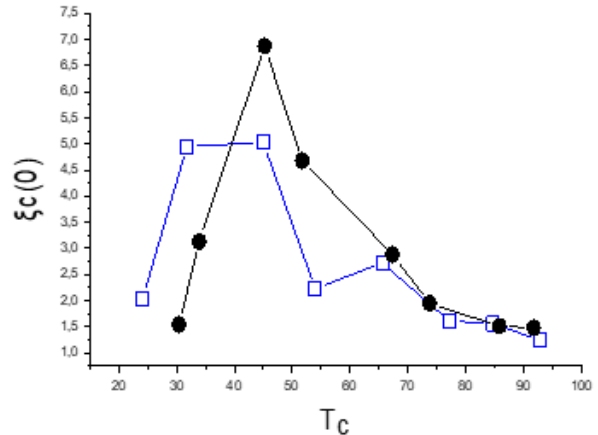
**Рис. 4.** Температурні залежності надлишкової провідності в  $ab$ -площині для монокристалів К1 – К6 у координатах  $\ln\Delta\sigma$ - $\ln\varepsilon$ . Позначення кривих відповідає позначенням на рис.1. Пунктирними лініями показана апроксимація експериментальних кривих прямими з кутами нахилу  $\alpha_1 \approx -0.5$  (3D - режим) і  $\alpha_2 \approx -1.0$  (2D - режим).

**Fig. 4.** Temperature dependences of excess conductivity in the  $ab$ -plane for single crystals K1 – K6 in coordinates  $\ln\Delta\sigma$ - $\ln\varepsilon$ . The notation of the curves corresponds to the notation in Fig. 1. Dotted lines show the approximation of the experimental curves by straight lines with an angle of inclination  $\alpha_1 \approx -0.5$  (3D mode) and  $\alpha_2 \approx -1.0$  (2D mode).

У цьому випадку, визначивши значення  $\varepsilon_0$  та використовуючи літературні дані про залежність  $T_c$  та міжплощинної відстані від  $\delta$  [39,40], можна обчислити значення  $\xi_c(0)$ . Залежність  $\xi_c(0)$  від дози опромінення представлена на вставці (б) до рис. 3. Як видно з рисунка, величина  $\xi_c(0)$ , розрахована згідно (3), збільшується від 1.3 до більш ніж 5 Å і пройшовши через максимум різко зменшується до значень близько 2 Å у міру збільшення дози опромінення та зниження

$T_c$ , що якісно відрізняється від залежності  $\xi_c(0)$  від  $D$ , одержаної на монокристалічних зразках  $YBaCuO$  [41] при опроміненні малими дозами швидких електронів до  $D = 8.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ .

Стрілками показані точки 2D-3D кросовера. На вставці (а) рис. 4 показані самі залежності для зразків К7 і К8. На вставці (б) рис. 4 показано концентраційні залежності довжини когерентності  $\xi_c(z)$ .



**Рис. 5.** Залежності  $\xi_c(0)$  від  $T_c$  для зразків  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (квадрати) і  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (кільця).

**Fig. 5.** Dependences of  $\xi_c(0)$  on  $T_c$  for samples  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (squares) and  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (rings).

Якісно подібна поведінка аналогічних залежностей  $\xi_c(0)$  від  $T_c$  спостерігалася і для зразків  $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  при різних концентраціях празеодима [42]. Залежності  $\xi_c(0)$  від  $T_c$  показані на рис. 5.

Немонотонний характер поведінки залежності  $\xi_c(0)$  від  $D$  та концентрації Pr, отриманої при опроміненні середніми дозами швидких електронів та допуванні празеодимом, очевидно, пов'язаний із загальним пригніченням надпровідних характеристик ВТНП-сполук  $YBaCuO$  при дозах опромінення  $D \geq 10^{20} \text{ cm}^{-2}$  і концентраціях празеодима  $z \geq 0.4$ , що детальніше обговорюється нами в [41-43]. Остаточна відповідь на це питання може бути отримана при аналізі впливу більш високих доз опромінення та концентрацій празеодиму на температурні залежності електроопору, в тому числі, безпосередньо до повного пригнічення надпровідності цих сполук.

## ВИСНОВКИ

Таким чином, узагальнюючи вищесказане, можна зробити висновок про те, що опромінення середніми дозами високоенергетичних електронів та збільшення ступеня допування празеодимом оптимально допованих киснем монокристалів  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  приводить до якісно подібних змін температурних

залежностей електроопору  $\rho(T)$  у аб-площині, зокрема до значного розширення температурного інтервалу існування надлишкової провідності  $\Delta\sigma(T)$ . При цьому, в обох випадках, відбувається кратне збільшення величини поперечної довжини когерентності  $\xi_c(0)$  та істотно зміщується за температурою точка 2D-3D кросовера. Вперше встановлено, що на відміну від випадку опромінення малими дозами високоенергетичних електронів ( $D \leq 10^{19} \text{ см}^{-2}$ ) та допування празеодимом до концентрацій  $z \leq 0.39$ , опромінення середніми дозами та допування празеодимом, при більш високих концентраціях, приводить до немонотонної залежності поперечної довжини когерентності  $\xi_c(0)$  від критичної температури  $T_c$  з характерними максимумами при  $D \sim (7-8) \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$  та  $z \approx 0.42$ , що може бути пов'язане із загальним пригніченням надпровідних характеристик.

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. R.V. Vovk, A.L. Solovyov. *Low Temp. Phys.*, 44, 111 (2018).
2. T.A. Friedman, J.P. Rice, J. Giapintzakis, and D.M. Ginzberg. *Phys. Rev. B*, 39, 4258 (1989).
3. R.V. Vovk, A.A. Zavgorodniy, M.A. Obolenskii, I.L. Goulatis, A. Chroneos and V.M. Pinto Simoes. *Modern Physics Letters B (MPLB)*, 24, 2295 (2010).
4. L. Mendonca Ferreira, P. Pureur, H. A. Borges, and P. Lejay. *Phys. Rev. B*, 69, 212505 (2004).
5. R.V. Vovk, G.Ya. Khadzhai, I.L. Goulatis, A. Chroneos. *Physica B: Condensed Matter* 436, 88 (2014).
6. H.A. Borges and M.A. Continentino. *Solid State Commun.* 80, 197 (1991).
7. A.L. Solovyov, L.V. Omelchenko, V.B. Stepanov, R.V. Vovk, H.-U. Habermeier, P. Przyslupski and K. Rogacki. *Phys. Rev. B*, 94, 224505-1 (2016).
8. А.Л. Соловьев, В.М. Дмитриев, В.Н. Светлов, В.Б. Степанов. *ФНТ*, 29, 1281 (2003).
9. R.V. Vovk, N.R. Vovk, G.Ya. Khadzhai, I.L. Goulatis, A. Chroneos. *Physica B*, 422, 33 (2013).
10. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.A. Zavgorodniy, Z.F. Nazyrov, I.L. Goulatis, V.V. Kruglyak, A. Chroneos. *Modern Physics Letters B (MPLB)*, 25, 2131 (2011).
11. T. Timusk and B. Statt. *Rep. Prog. Phys.* 62, 61 (1999).
12. L.G. Aslamazov and A.I. Larkin. *Phys. Lett.*, 26A, 238 (1968).
13. W.E. Lawrence and S. Doniach. *Proceedings of the 12th International Conference on Low Temperature Physics, Kyoto, Japan*, ed. by E. Kanda, Tokyo, Keigaku, 361 (1970).
14. J.B. Bieri, K. Maki and R.S. Thompson. *Phys. Rev. B*, 44, 4709 (1991).
15. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.A. Zavgorodniy, A.V. Bondarenko, I.L. Goulatis, A.I. Chroneos. *J Mater Sci: Mater in Electron*, 18, 811 (2007).
16. N.A. Azarenkov, V.N. Voevodin, R.V. Vovk, G.Ya. Khadzhai, S.V. Lebedev, V.V. Sklyar, S.N. Kamchatnaya, O.V. Dobrovolskiy, *J Mater Sci: Mater Electron*, 28, 21, 15886 (2017).
17. R.V. Vovk, G.Ya. Khadzhai, O.V. Dobrovolskiy. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* (2019). <https://doi.org/10.1007/s10854-019-00770-x>
18. Akhavan M. *Physica B*, 321, 265 (2002).
19. A.L. Solovjov, L.V. Omelchenko, E.V. Petrenko, R.V. Vovk, V.V. Khotkevych, and A. Chroneos. *Scientific Reports*, 9, 20424 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55959-1>
20. V.I. Beletskiy, G.Ya. Khadzhai, R.V. Vovk, N.R. Vovk, A.V. Samoilyov, I.L. Goulatis, O.V. Dobrovolskiy. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 6688 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10854-019-00978-x>
21. J. Ashkenazi, *J. Supercond. Nov. Magn.*, 24, 1281 (2011).
22. A.L. Solovjov, E.V. Petrenko, L.V. Omelchenko, R.V. Vovk, I. L. Goulatis and A. Chroneos. *Scientific Reports* 9, 9274 (2019).
23. Oduleye O. O., Penn S. J., Alford N. McN., et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond*, 9, 2, 2621 (1999).
24. Q. Wang, G.A. Saunders, H.J. Liu, M.S. Acres, and D.P. Almond. *Phys. Rev. B*, 55, 8529 (1997).
25. А.Л. Соловьев и др. *ФНТ*, 29, 1281 (2003).
26. A.I. Chroneos, I.L. Goulatis and R.V. Vovk. *Acta Chim. Slov.*, 54, 179 (2007).
27. H.A. Азаренков, В.Н. Воеводин, Р.В. Вовк, Г.Я. Хаджай. *ФНТ*, 44, 8, 1100 (2018).
28. N.A. Azarenkov, V.N. Voevodin, R.V. Vovk, N.R. Vovk, G.Ya. Khadzhai, S.N. Kamchatnaya. *VANT ISSN 1562-6016. PAST*, 2 (126), 9 (2020).
29. G.Ya. Khadzhai, R.V. Vovk, O.V. Dobrovolskiy. *Physica B: Condensed Matter*, 566, 121 (2019).
30. G.Ya. Khadzhai, R.V. Vovk, Z.F. Nazyrov, O.V. Dobrovolskiy. *Physica*, 565, 1353507 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.physc.2019.1353507>
31. G.Ya. Khadzhai, Yu.V. Litvinov, R.V. Vovk, S.F. Zdorovko, I.L. Goulatis, A. Chroneos. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 7725 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8768-y>
32. Q. Wang, G.A. Saunders, H.J. Liu, M.S. Acres, and D.P. Almond. *Phys. Rev. B*, 55, 8529 (1997).
33. Khadzhai G.Y., Sklyar V.V., Vovk R.V. *Low Temperature Physics*, 48(3), 271 (2022).
34. Ginsberg D.M. (ed). *Physical properties high temperature superconductors I*, Singapore, Word Scientific (1989), 640 p.
35. J.M. Valles, Jr., A.E. White, K.T. Short, R.C. Dynes, J.P. Garno, A.F.J. Levi, M. Anzlowar, and K. Baldwin. *Phys. Rev. B*, 39, 11599 (1989).
36. M.C. Frishherz, M.A. Kirk, G.P. Zhang, H.W. Weber. *Philosophical Magazine A*, 67, 1347 (1993).
37. A.K. Gosh, S.K. Bandyopadhyay and A.N. Basu. *J. Appl. Phys.* 86, 3247 (1999).
38. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.A. Zavgorodniy, A.V. Bondarenko, I.L. Goulatis, A.V. Samoilyov, A.I. Chroneos. *Journal of Alloys and Compounds*, 453, 69 (2008).
39. G.D. Chryssikos, E.I. Kamitsos, J.A. Kapoutsis, A.P. Patsis, V. Psycharis, A. Koufoudakis, C. Mitros, G. Kallias, E. Gamari-

Seale, and D. Niarchos. Phys. C: Superconductivity, 254, 44 (1995).  
40. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, Z.F. Nazzyrov, I.L. Goulatis, A. Chroneos and V.M. Pinto Simoes. J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 23, 1255 (2012).  
41. A. Chroneos, D.D. Kolesnikov, I.A. Taranova, A.V. Matsepulin, R.V. Vovk. ISSN 0957-4522 MSME. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04476-3>  
42. R.V. Vovk, Z.F. Nazzyrov, L.I. Goulatis, A. Chroneos. Journal of Low Temperature Physics, 170, 3-4, 216 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10909-012-0755-8>  
43. R.V. Vovk, N.R. Vovk, G.Ya. Khadzhai, I.L. Goulatis, A. Chroneos. Solid State Communications, 190,18 (2014).

#### REFERENCES

1. R.V. Vovk, A.L. Solovyov. Low Temp. Phys., 44, 111 (2018).
2. T.A. Friedman, J.P. Rice, J. Giapintzakis, and D.M. Ginzberg. Phys. Rev. B, 39, 4258 (1989).
3. R.V. Vovk, A.A. Zavgorodniy, M.A. Obolenskii, I.L. Goulatis, A. Chroneos and V.M. Pinto Simoes. Modern Physics Letters B (MPLB), 24, 2295 (2010).
4. L. Mendonca Ferreira, P. Pureur, H. A. Borges, and P. Lejay. Phys. Rev. B, 69, 212505 (2004).
5. R.V. Vovk, G.Ya. Khadzhai, I.L. Goulatis, A. Chroneos. Physica B: Condensed Matter, 436, 88 (2014).
6. H.A. Borges and M.A. Continentino. Solid State Commun, 80, 197 (1991).
7. A.L. Solovyov, L.V. Omelchenko, V.B. Stepanov, R.V. Vovk, H.-U. Habermeier, P. Przyslupski and K. Rogacki. Phys. Rev. B, 94, 224505-1 (2016).
8. A.L. Solovjov V.M. Dmitriev V.N. Svetlov, V.B. Stepanov. Low Temp. Phys., 29, 1281 (2003). (In Russian).
9. R.V. Vovk, N.R. Vovk, G.Ya. Khadzhai, I.L. Goulatis, A. Chroneos. Physica B, 422, 33 (2013).
10. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.A. Zavgorodniy, Z.F. Nazzyrov, I.L. Goulatis, V.V. Kruglyak, A. Chroneos. Modern Physics Letters B (MPLB), 25, 2131 (2011).
11. T. Timusk and B. Statt. Rep. Prog. Phys. 62, 61 (1999).
12. L.G. Aslamazov and A.I. Larkin. Phys. Lett., 26A, 238 (1968).
13. W.E. Lawrence and S. Doniach. Proceedings of the 12th International Conference on Low Temperature Physics, Kyoto, Japan, ed. by E. Kanda, Tokyo, Keigaku, 361 (1970).
14. J.B. Bieri, K. Maki and R.S. Thompson. Phys. Rev. B, 44, 4709 (1991).
15. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.A. Zavgorodniy, A.V. Bondarenko, I.L. Goulatis, A.I. Chroneos. J Mater Sci: Mater in Electron, 18, 811 (2007).
16. N.A. Azarenkov, V.N. Voevodin, R.V. Vovk, G.Ya. Khadzhai, S.V. Lebedev, V.V. Sklyar, S.N. Kamchatnaya, O.V. Dobrovolskiy. J Mater Sci: Mater Electron, 28, 21, 15886 (2017).
17. R.V. Vovk, G.Ya. Khadzhai, O.V. Dobrovolskiy. Journal of Materials Science: Materials in Electronics (2019). <https://doi.org/10.1007/s10854-019-00770-x>
18. Akhavan M. Physica B, 321, 265 (2002).
19. A.L. Solovjov, L.V. Omelchenko, E.V. Petrenko, R.V. Vovk, V.V. Khotkevych, and A. Chroneos. Scientific Reports, 9, 20424 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55959-1>

20. V.I. Beletskiy, G.Ya. Khadzhai, R.V. Vovk, N.R. Vovk, A.V. Samoylev, I.L. Goulatis, O.V. Dobrovolskiy. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 30, 6688 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10854-019-00978-x>
21. J. Ashkenazi, J. Supercond. Nov. Magn., 24, 1281 (2011).
22. A.L. Solovjov, E.V. Petrenko, L.V. Omelchenko, R.V. Vovk, I. L. Goulatis and A. Chroneos. Scientific Reports, 9, 9274 (2019).
23. Oduleye O. O., Penn S. J., Alford N. McN., et al. IEEE Trans. Appl. Supercond, 9, 2, 2621 (1999).
24. Q. Wang, G.A. Saunders, H.J. Liu, M.S. Acres, and D.P. Almond. Phys. Rev. B 55, 8529 (1997).
25. A.L. Solovjov and other. Low Temp. Phys 29, 1281 (2003) (In Russian).
26. A.I. Chroneos, I.L. Goulatis and R.V. Vovk. Acta Chim. Slov., 5, 179 (2007).
27. N.A. Azarenkov, V.N. Voevodin, R.V. Vovk, G.Ya. Khadzhai. ФИТ, 44, 8, 1100 (2018). (In Russian).
28. N.A. Azarenkov, V.N. Voevodin, R.V. Vovk, N.R. Vovk, G.Ya. Khadzhai, S.N. Kamchatnaya. VANT ISSN 1562-6016. PAST, 2 (126), 9 (2020).
29. G.Ya. Khadzhai, R.V. Vovk, O.V. Dobrovolskiy, Physica B: Condensed Matter, 566, 121, (2019).
30. G.Ya. Khadzhai, R.V. Vovk, Z.F. Nazzyrov, O.V. Dobrovolskiy. Physica C, 565, 1353507 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.physc.2019.1353507>
31. G.Ya. Khadzhai, Yu.V. Litvinov, R.V. Vovk, S.F. Zdorovko, I.L. Goulatis, A. Chroneos. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 29, 7725 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8768-y>
32. Q. Wang, G.A. Saunders, H.J. Liu, M.S. Acres, and D.P. Almond. Phys. Rev. B, 55, 8529 (1997).
33. Khadzhai G.Y., Sklyar V.V. Vovk R.V. Low Temperature Physics, 48(3), 271 (2022).
34. Ginsberg D.M. (ed). Physical properties high temperature superconductors I, Singapore, Word Scientific (1989), 640 p.
35. J.M. Valles, Jr., A.E. White, K.T. Short, R.C. Dynes, J.P. Garno, A.F.J. Levi, M. Anzlowar, and K. Baldwin. Phys. Rev. B, 39, 11599 (1989).
36. M.C. Frishherz, M.A. Kirk, G.P. Zhang, H.W. Weber. Philosophical Magazine A, 67, 1347 (1993).
37. A.K. Gosh, S.K. Bandyopadhyay and A.N. Basu. J. Appl. Phys. 86, 3247 (1999).
38. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.A. Zavgorodniy, A.V. Bondarenko, I.L. Goulatis, A.V. Samoylev, A.I. Chroneos. Journal of Alloys and Compounds, 453, 69 (2008).
39. G.D. Chryssikos, E.I. Kamitsos, J.A. Kapoutsis, A.P. Patsis, V. Psycharis, A. Koufoudakis, C. Mitros, G. Kallias, E. Gamari-Seale, and D. Niarchos. Phys. C: Superconductivity, 254, 44 (1995).
40. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, Z.F. Nazzyrov, I.L. Goulatis, A. Chroneos and V.M. Pinto Simoes. J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 23, 1255 (2012).
41. A. Chroneos, D.D. Kolesnikov, I.A. Taranova, A.V. Matsepulin, R.V. Vovk. ISSN 0957-4522 MSME. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04476-3>
42. R.V. Vovk, Z.F. Nazzyrov, L.I. Goulatis, A. Chroneos. Journal of Low Temperature Physics, 170, 3-4, 216 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10909-012-0755-8>
43. R.V. Vovk, N.R. Vovk, G.Ya. Khadzhai, I.L. Goulatis,

## **EVOLUTION OF FLUCTUATION CONDUCTIVITY OF $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\Delta}$ SINGLE CRYSTALS UNDER THE INFLUENCE OF MEDIUM DOSES OF ELECTRON IRRADIATION AND DOPING WITH PRASEODYMIUM**

M.O. Azarenkov<sup>1,2</sup>, G.Ya. Khadzhai<sup>1</sup>, A.V. Matsepulin<sup>1</sup>,  
M.V. Korobkov<sup>1</sup>, A.O. Komisarov<sup>1</sup>, A.I. Rusalovich<sup>1,3</sup>, Junyi Du<sup>1,4</sup>,  
S.M. Kamchatnaya<sup>1,3</sup>, A.Yu. Vragov<sup>1</sup>, L.O. Pashchenko<sup>1</sup>,  
V.Yu. Gres<sup>1</sup>, E.S. Gevorkyan<sup>1,3,5</sup>, R.V. Vovk<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup>Institute of Solid State Physics, Materials Science and Technologies, NSC-KIPT, 61108, Akademichna St. 1, Kharkiv, Ukraine

<sup>3</sup>Ukrainian State University of Railway Transport, 61050, Feierbakh Sq. 7, Kharkiv, Ukraine.

<sup>4</sup>School of Mathematical Sciences, Luoyang Normal University, Luoyang 471934, China

<sup>5</sup>Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities in Radom, Stasickiego 54, 26-600 Radom, Poland.

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

Received on April 21, 2023. Reviewed on June 03, 2023.

Accepted for publication on June 12, 2023.

The influence of medium doses (from  $10^{19}$  cm<sup>-2</sup> to  $10^{20}$  cm<sup>-2</sup>) of irradiation with fast electrons and changes in the concentration of praseodymium in the interval  $0.0 \leq z \leq 0.5$  on the excess conductivity of optimally oxygen-doped  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystals was studied. It is shown that electron irradiation and an increase in the degree of doping with praseodymium leads to a significant expansion of the temperature interval of the existence of excess conductivity, thereby narrowing the region of the linear dependence of  $\rho(T)$  in the ab-plane. It was established that at doses  $0 \leq D \leq 6.5 \times 10^{19}$  cm<sup>-2</sup> the value of the value of the transverse coherence length  $\xi_c(0)$  increases with an increase in  $D$  approximately 3 times and more than four times as the praseodymium content in the sample increases to  $z \approx 0.42$ . At the same time, in both cases, the 2D-3D crossover point is shifted by temperature. In contrast to the case of irradiation with small doses ( $D \leq 10^{19}$  cm<sup>-2</sup>) and doping with praseodymium up to concentrations  $z \leq 0.39$ , irradiation with medium doses and doping with praseodymium at higher concentrations leads to a non-monotonic dependence of the transverse coherence length  $\xi_c(0)$  with characteristic maxima at  $D \sim (7-8) \times 10^{19}$  cm<sup>-2</sup> and  $z \approx 0.42$ , which may be related to the general suppression of superconducting characteristics.

**Key words:**  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystals, superconductivity, irradiation, fast electrons, 2D-3D crossover.