

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Ду Дзюньї

«Модифікація опроміненням та високим тиском магніторезистивних характеристик монокристалів $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з заданою топологією дефектної структури»

яка подається на здобуття ступеня доктора філософії

з галузі знань 10 – Природничі науки

за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

1. Оцінка роботи здобувача у процесі підготовки дисертації і виконання індивідуального плану навчальної та наукової роботи.

Аспірант Ду Дзюньї виконала у повному обсязі Індивідуальний план Освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії. Освітня програма в обсязі 40 кредитів ECTS виконана у повному об'ємі. Вона успішно склала сім заліків та один екзамен з наступних дисциплін:

Заліки:

- 1) «Філософські засади та методологія наукових досліджень» – 60 балів;
- 2) «Підготовка наукових публікацій та презентація результатів досліджень» – 82 балів;
- 3) «Планування, організація і проведення наукових досліджень та навчальних занять» – 73 бали;
- 4) «Історія та методологія фізики та астрономії» – 79 балів;
- 5) «Методологія застосування сучасних інформаційних технологій для автоматизації наукових та навчальних експериментів» – 75 балів;
- 6) «Вибрані розділи сучасної фізики низьких температур» – 70 балів;
- 7) «Вибрані розділи сучасної фізики твердого тіла» – 70 балів.

Екзамен:

- 8) Іноземна мова для аспірантів (англійська мова) – 63 бали.

Всі заплановані види робіт було виконано у повному обсязі та своєчасно. Здобувач плідно співпрацював з науковим керівником протягом усього терміну навчання в аспірантурі.

2. Обґрунтування вибору теми дослідження.

Дисертація присвячена дослідженням температурних залежностей поздовжнього та поперечного електроопору монокристалів $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з різним вмістом празеодиму, в тому числі в умовах дії високого тиску та радіаційного опромінення. Досліджувана сполука є надпровідником другого роду, її резистивні характеристики та анізотропія процесів переносу в інтервалі від області температур надпровідного стану до кімнатних температур є чутливою до структурних змін кристалічної ґратки. Ступінь допудвання киснем впливає на кристалічну структуру сполуки й кардинальним чином змінює механізми електричної провідності монокристалів $Y_{1-z}Pr_zBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. З іншого боку, створення радіаційних дефектів різної концентрації та морфології в широкому інтервалі доз опромінення також впливає на вказані властивості досліджуваної речовини. У

дисертаційній роботі досліджені закономірності та механізми впливу опромінення на структуру та процеси електропереносу у сполуках системи 1 – 2 – 3 на основі сучасних уявлень про природу провідності в шаруватих кристалічних сполуках ВТНП.

Незважаючи на досить велику кількість наукових праць, присвячених вивченню впливу різного роду чинників на електротransпорт в системі $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, у науковій літературі майже відсутні праці, в яких описані результати досліджень щодо вивчення впливу опромінення на анізотропію процесів розсіювання носіїв заряду як у нормальному стані, так і поблизу надпровідного переходу, псевдощільнину та флуктуаційну аномалії, а також некогерентний електротransпорт. Оскільки, відповідно до сучасних уявлень, саме ці незвичайні фізичні явища, що спостерігаються у ВТНП – сполуках у нормальному (не надпровідному) стані, є важливими для розуміння фізичної суті мікроскопічної природи ВТНП, яка все ще залишається нез'ясованою, незважаючи на більш ніж 37 – річну історію інтенсивних теоретичних та експериментальних досліджень, проведених в цій галузі фізики твердого тіла.

Метою дисертації є розв'язання актуального наукового завдання, яке полягає у встановленні фізичних закономірностей еволюції магніторезистивних характеристик у шаруватих ВТНП – сполуках сімейства $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-x}$ в умовах дії екстремальних зовнішніх чинників (низької температури, високого тиску і електронного опромінення).

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі конкретні задачі:

1. Виготовити високодосконалі монокристалічні зразки сполуки $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ та $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ для магніторезистивних досліджень та провести їх опромінення високоенергетичними електронами з енергіями 0.5 – 2.5 MeV при різних дозах;
2. Виготовити експериментальні зразки з монокристалів сполук $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ та $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ у виді містків для резистивних досліджень з системою односпрямованих двійникових меж;
1. Дослідити динаміку магнітного потоку і особливості піннінгу магнітних вихорів (ефект закріплення) на звичайних "непружних" та "пружних" двійниках, тобто на двійниках, клиновидні вершини яких в напрямку двійникування не виходять за поверхню кристала;
2. Виміряти температурні залежності електроопору в базисній площині монокристалів $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ та $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ до і після опромінення та провести їх кількісний аналіз у широкому інтервалі від кімнатних температур до температури надпровідного переходу, а також провести апроксимацію процесів переносу заряду в монокристалах $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ на основі апробованих теоретичних моделей, зокрема моделей Блоха – Грюнайзена та Асламазова – Ларкіна;
3. Виділити окремі механізми розсіювання носіїв заряду в монокристалах $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ та їх додаткові внески у провідність зразків при наближенні до температури надпровідного переходу і вивчити вплив опромінення на параметри, що характеризують вищевказані механізми розсіювання носіїв заряду;
4. Провести порівняльний аналіз впливу радіаційних і домішкових дефектів на флуктуаційну провідність, що домінує в температурному інтервалі поблизу критичної температури, T_c ;
5. дослідити вплив прикладання високого гідростатичного тиску до 14 кбар на електроопір та фазове розшарування в базисній площині монокристалів $Y_{0.77}Pr_{0.23}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$.

Об'єктом дослідження динаміка переносу заряду та магнітного потоку в ВТНП – сполуках системи $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($\text{Re} = \text{Y}, \text{Pr}$) під дією опромінення високоенергетичними електронами з енергіями 0.5 – 2.5 MeV при дозах до $D = 10^{20} \text{ см}^{-2}$ та високого гідростатичного тиску

Предметом дослідження є процеси транспорту носіїв заряду та механізми їх розсіювання в монокристалічних зразках $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($\text{Re} = \text{Y}, \text{Pr}$) в умовах дії екстремальних зовнішніх чинників (низької температури, високого тиску і електронного опромінення).

Методи дослідження. У дисертаційній роботі для вирішення поставлених завдань були використані та апробовані експериментальні методи фізики конденсованого стану при низьких температурах. ВТНП – монокристали системи 1 – 2 – 3 вирощували за розчин – розплавною методикою в золотих тиглях та тиглях, виготовлених з кераміки ZrO_2 . Насичення кристалів киснем здійснювали в атмосфері кисню при 420°C протягом трьох діб. Дослідження структури зразків здійснювались з використанням оптичної та растрової електронної мікроскопії. Опромінення електронами з енергіями 0.5...2.5 MeV проводили при температурах $T < 10 \text{ K}$ на прискорювачі електронів. Дозі опромінення 10^{18} см^{-2} електронами з енергією 2.5 MeV відповідає усереднена по всіх підгратках концентрація дефектів 10^{-4} зміщень/ат. Використання гелієвого кріостату давало можливість проводити вимірювання опору після опромінення в інтервалі температур $10 < T < 300 \text{ K}$. Динаміку магнітного потоку досліджували магнітотранспортним методом. Вимірювання електроопору проводили методом Монтгомері. Температуру експериментальних зразків вимірювали платиновими термометрами електроопору. Спад електричної напруги вимірювали нановольтметрами В2–38. Обробку результатів здійснювали з використанням комп'ютерних програм Microcal Origin та Matlab.

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана на кафедрі фізики низьких температур Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Результати, які представлені в дисертаційній роботі, були отримані при проведенні досліджень у рамках виконання держбюджетних НДР: № ДР 0117U004857 та № ДР 0116U000827, а також за підтримки програми Horizon 2020 у рамках гранту № 644348.

4. Особистий внесок дисертанта в отриманні наукових результатів та їх новизна.

Здобувач брав безпосередню участь у постановці завдань дисертаційної роботи, підготовці зразків, розробці методики автоматичного вимірювання резистивних та магніторезистивних залежностей зразків у широкому інтервалі температур. Експериментальні дослідження температурних залежностей поздовжнього та поперечного електроопору в зразках, що були опромінені високоенергетичними електронами, виконані здобувачем особисто. Всі дослідження впливу опромінення на анізотропію магнітоопору монокристалічного зразка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ проведені за безпосередньою участю здобувача. При підготовці всіх публікацій за темою дисертаційної роботи здобувач брав участь в аналізі, систематизації, узагальненні та тлумаченні отриманих результатів, на основі яких він спільно з науковим керівником сформулював висновки дисертаційної роботи.

Наукова новизна результатів полягає в наступному:

Вперше:

- 1) Вперше встановлено, що межі «пружних» двійників є ефективними центрами піннінга ліній магнітного потоку в монокристалах досліджуваної сполуки. Основними центрами закріплення вихорів є дислокаційні скупчення, які утворюються в вершинах «пружних» двійників. Лінії дислокацій розташовуються в площині двійників і, при збігові орієнтації магнітних вихрів та дислокаційних ліній, зменшується енергія вихорів, з'являється сила піннінга, що закріплює їх місце розташування, а, в підсумку, і приводить до збільшення критичної густини транспортного електричного струму.
- 2) Вперше встановлено, що, на відміну від чистих зразків $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ з оптимальним вмістом кисню, прикладання високого тиску приводить до фазового розшарування в базисній площині монокристалів $\text{Y}_{0.77}\text{Pr}_{0.23}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Встановлено, що у нормальному стані провідність є металевою та обмежується розсіюванням на фонах (режим Блоха-Грюнейзена) та дефектах. Встановлено, що гідростатичний тиск приводить до зменшення залишкового та фононного опорів. Температура Дебая та довжина когерентності не залежать від тиску.
- 3) Показано, що надлишкова провідність $\Delta\sigma(T)$ підкоряється експоненціальній температурній залежності в широкому діапазоні температур $T_1 < T < T^*$. Залежність $\Delta\sigma(T) \sim (1-T/T^*)\exp(\Delta^*_{ab}/T)$ інтерпретується в термінах теорії середнього поля, де T^* - середньопольова температура переходу в псевдощілинний стан, і температурна залежність псевдощілини задовільно описується в межах теорії переходу БКШ-БЕК.
- 4) Вперше досліджено вплив середніх доз (від 10^{19} до 10^{20} cm^{-2}) опромінення швидкими електронами та зміни концентрації празеодиму в інтервалі $0.0 \leq z \leq 0.5$ на надлишкову провідність оптимально допованих киснем монокристалів $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Встановлено, що при дозах $0 \leq D \leq 6.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ 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 зміщується за температурою точка 2D-3D кросовера.
- 5) Показано, що на відміну від випадку опромінення малими дозами ($D \leq 10^{19} \text{ cm}^{-2}$) 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 $\xi_c(0)$ з характерними максимумами при $D \sim 7-8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ та $z \approx 0.42$, що може бути пов'язане із загальним пригніченням надпровідних характеристик.

5. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і

рекомендацій, які захищаються.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, результатів і висновків дисертації Ду Дзюньї забезпечена використанням сучасним методів фізики конденсованого стану, а також ретельним співставленням одержаних результатів із першоджерел наукової літератури. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані в закордонному періодичному науковому виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus (Q3) та науковому фаховому виданні України. Вони також доповідалися на міжнародних наукових конференціях. Висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими.

6. Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації.

- Основні наукові результати роботи можуть бути використані для подальшого пошуку шляхів модифікації електрофізичних характеристик матеріалів на основі купратних ВТНП – сполук сімейства $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($R = \text{Ho}, \text{Y}, \text{Pr}, \text{Sc}$) під впливом опромінення електронами. Як відомо, електротransпортні характеристики визначають важливі конструкційні та експлуатаційні властивості ВТНП – сполук, що застосовуються як датчики чи лінії передачі електричної енергії.
- Опромінення електронами є вельми ефективним засобом створення значної кількості дефектів без зміни складу об'єкту, що опромінюється. Це дає можливість відокремити ефекти, які пов'язані безпосередньо з дефектами, що можуть виникнути як у процесі контрольованого впливу, так і під час експлуатації систем на основі ВТНП – сполук. Зокрема, встановлений вплив опромінення електронами на процеси розсіювання носіїв заряду на дефектах та фононах, на флуктуаційну провідність, фазове розшарування та стабільність характеристик, дасть можливість прогнозувати поведінку вказаних матеріалів в екстремальних умовах та створювати зразки з бажаними функціональними характеристиками.
- Підвищення критичної температури надпровідного переходу та критичного струму існуючих високотемпературних надпровідників пов'язане з модифікацією їх властивостей за рахунок створенням певного ансамблю дефектів. Шляхом до зменшення енергоспоживання, підвищення швидкодії та мініатюризації надпровідних приладів є створення різного роду штучних наноструктур завдяки опроміненню керамічних надпровідників електронами чи іонами. Тому дослідження впливу опромінення електронами певних енергій на електричний опір системи $\text{Y} - \text{Ba} - \text{Cu} - \text{O}$ у широкому інтервалі температур від температури надпровідного переходу до кімнатних може дати важливу інформацію про взаємодію носіїв заряду з фононною та дефектною підсистемами, що необхідно для здійснення контрольованого впливу на властивості матеріалу.
- Отримані результати можуть бути також використані при підготовці бакалаврів та магістрів фізичних спеціальностей, а саме при викладанні спецкурсів та проведенні лабораторних практикумів.

7. Повнота викладення матеріалів дисертації в роботах, опублікованих автором.

Результати дисертаційної роботи опубліковані у 6 наукових працях, серед яких 4 наукові статті опубліковано у наукових фахових виданнях України, 2 наукові статті опубліковано у наукових періодичних виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus та 1 тези доповідей на міжнародних наукових конференціях.

8. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Список публікацій здобувача за темою дисертації у закордонному періодичному науковому виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus:

- 1) G.Ya. Khadzhai, V.Yu. Gres, Junyi Du, Z.F. Nazarov, A.L. Solovyov, N.R. Vovk, R.V. Vovk / Influence of pressure on the critical temperature and resistivity of $Y_{0.77}Pr_{0.23}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystals // Functional Materials, 2022, 29(3). стр. 346-358 (Scopus, Q3)

DOI: <https://doi.org/10.15407/fm29.03.346>

(Особистий внесок здобувача: участь у постановці та обговоренні задачі, а також її розв'язання, оформлення тексту роботи)

- 2) Yu.I. Boyko, V.V. Bogdanov, N.R. Vovk, A.O. Komisarov, Junyi Du, Z.F. Nazarov, A.V. Samoylov, E.S. Gevorkyan, R.V. Vovk. // Пружні та непружні двійники та піннінг ліній магнітного потоку (вихорів) в монокристалах $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Fizika Nizkikh Temperatur, 2023, 49(4), 444–451 (Scopus, Q3)

DOI: <https://doi.org/10.1063/10.0017579>

(Особистий внесок здобувача: участь у постановці, обговоренні та розв'язання поставленої задачі, проведенні розрахунків, оформлення тексту роботи)

Список публікацій здобувача за темою дисертації у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України:

- 3) N.A. Azarenkov, G.Ya. Khadzhai, A.V. Matsepulin, M.V. Korobkov, A.O. Komisarov, A.I. Rusalovich, Junyi Du, S.N. Kamchatnaya, A.Yu. Vragov, L.A. Paschenko, V.Yu. Gres, E.S. Gevorkyan, R.V. Vovk / Evolution of fluctuation conductivity of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystals under the influence of medium doses of electron irradiation and doping with praseodymium. // Journal of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series "Physics". Vol. 38, p.p. 7-14 (2023).

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

(Особистий внесок здобувача: участь у постановці, обговоренні та розв'язання поставленої задачі, проведенні розрахунків, оформлення тексту роботи)

- 4) L.O. Pashchenko, Junyi Du, A.O. Komisarov, Z.F. Nazarov, R.V. Vovk / Features of the crystal structure and the effect of prolonged exposure to air on the electrical transport of the 1-2-3 system compounds (review) // Journal of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Physics", Vol. 39, p.p. 7-25 (2023).

DOI: <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-39-01>.

(Особистий внесок здобувача: участь у постановці, обговоренні та розв'язання поставленої задачі, проведенні розрахунків, оформлення тексту роботи)

- 5) Г. Я. Хаджай, В. Ф. Коршак, С. В. Савич, Junyi Du, Р. В. Вовк / Вплив високого тиску на температурну залежність псевдощілини монокристалів $Y_{0.66}Pr_{0.34}Ba$

$\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ // Journal of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Physics", Vol.40, p.73-77 (2024).

DOI: <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2024-40-05>.

(Особистий внесок здобувача: участь у постановці, обговоренні та розв'язання поставленої задачі, проведенні розрахунків, оформлення тексту роботи)

- 6) Г. Я. Хаджай, В. Ф. Коршак, М. Г. Ревякіна, О. Л. Чикіна, А. О. Комісаров, О. Ю. Врагов, Junyi Du, Л. О. Пашенко, Р. В. Вовк / Еволюція температурних залежностей електроопору монокристалів $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ в широкому інтервалі прикладеного тиску і концентрацій домішок празеодиму // Journal of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Physics", Vol.40, p.53-58 (2024).

DOI: <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-40-03>.

(Особистий внесок здобувача: участь у постановці, обговоренні та розв'язання поставленої задачі, проведенні розрахунків, оформлення тексту роботи)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Л.О. Пашенко, Junyi Du, А.О. Комісаров, М.В. Коробков, Р.В. Вовк/ Модифікація електронним опроміненням поздовжнього електроопору ВТНП-монокристалів YBaCuO // Збірник матеріалів міжнародної конференції «Ядерна фізика на Закарпатті» (до 55-річчя відділу фотоядерних процесів ІЕФ НАН України) 21-23 травня 2024 року.

(Особистий внесок здобувача: участь у постановці, обговоренні та розв'язання поставленої задачі, проведенні розрахунків, оформлення тексту роботи)

Результати дисертаційної роботи повністю відображено в публікаціях.

9. Апробація матеріалів дисертації.

Основні результати досліджень були представлені, обговорені і опубліковані в тезах доповідей в міжнародних наукових конференціях:

1. Міжнародній конференції «Ядерна фізика на Закарпатті» (до 55-річчя відділу фотоядерних процесів ІЕФ НАН України) м. Ужгород, 21-23 травня 2024 року.

10. Дотримання академічної доброчесності

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет системі [StrikePlagiarism.com](https://www.strikeplagiarism.com)) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

11. Оцінка мови та стилю дисертації.

Матеріал дисертації викладено в логічній послідовності та доступний для сприйняття. Дисертація написана науковим стилем мовлення, структура дисертації відповідає алгоритму здійсненого автором дослідження. Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам відповідно постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, зі змінами, внесеними згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 21.03.2022 року № 341), Наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки України від 31.05.2019 року № 759).

12. Відповідність змісту дисертації спеціальності з відповідної галузі знань, з якої вона подається до захисту.

За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною і практичною значимістю дисертаційна робота Ду Дзюньї «Модифікація опроміненням та високим тиском магніторезистивних характеристик монокристалів $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з заданою топологією дефектної структури» відповідає спеціальності 104 – Фізика та астрономія. Здобувачем повністю виконана освітня та наукова складові освітньо-наукового рівня вищої освіти.

13. Результати обговорення та проведення презентації. Рекомендація дисертації до захисту.

Здобувач представив основні результати досліджень своєї дисертаційної роботи на розширеному засіданні кафедри фізики низьких температур Фізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № від 12 травня 2025 року) у формі презентації та наукової дискусії після її завершення.

Враховуючи високий рівень виконаних досліджень, а також актуальність теми роботи, наукову новизну результатів та їх наукове і практичне значення, на розширеному засіданні кафедри було одностайно ухвалене рішення про рекомендацію дисертації Ду Дзюньї «Модифікація опроміненням та високим тиском магніторезистивних характеристик монокристалів $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з заданою топологією дефектної структури» до захисту в спеціалізованій вченій раді для здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія з галузі знань 10 – Природничі науки.

В.о. завідувача кафедри
фізики низьких температур
фізичного факультету
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна,
доктор фізико-математичних наук,
професор



Валерій ШКЛОВСЬКИЙ