

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту теоретичної фізики

ім. М. М. Боголюбова

Національної академії наук України

доктор фізико-математичних наук


Сергій ПЕРЕПЕЛИЦЯ

“24” лютого 2026 р.



ВИСНОВОК

відділу синергетики

Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова

Національної академії наук України

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів

дисертації Клена Микити Дмитровича на тему:

«Статистичні моделі та часова когерентність квантового світла в
турбулентній атмосфері»,

поданої на здобуття ступеня доктора філософії

10 – Природничі науки

за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

ВИТЯГ

з протоколу № 1 від 11 лютого 2026 р.

засідання відділу синергетики

Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова

Національної академії наук України

СЛУХАЛИ: аспіранта Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України Клена Микити Дмитровича за матеріалами дисертаційної роботи “Статистичні моделі та часова когерентність квантового світла в турбулентній атмосфері”, що висувається на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

ПРИСУТНІ:

керівник семінару – академік НАН України, доктор фіз.-мат. наук, проф. Богдан ЛЕВ;

член-кор. НАН України, доктор наук з галузі "Природничі

науки" Андрій СЕМЕНОВ;
доктор фіз.-мат. наук Сергій ПЕРЕПЕЛИЦЯ;
доктор фіз.-мат. наук Володимир ЗАСЕНКО;
доктор фіз.-мат. наук О. К. ВІДИБІДА;
доктор фіз.-мат. наук Ярослав ЗОЛОТАРЮК;
кандидат фіз.-мат. наук Іван СТАРОДУБ;
кандидат фіз. мат. наук Віктор ЖАБА;
кандидат фіз.-мат. наук Андрій МАХОРТ;
кандидат фіз.-мат. наук Володимир КОЗИРСЬКИЙ;
кандидат фіз.-мат. наук Ольга КОЧЕРГА;
кандидат фіз.-мат. наук Олександр ЧЕРНЯК;
кандидат фіз.-мат. наук Євген СТОЛЯРОВ;
кандидат фіз.-мат. наук Анатолій ЖОХІН;
провідний інженер Іван МАКОВСЬКИЙ;
аспірант Вадим КОВТОНЮК;
аспірант Іван ЄРЕМЕНКО;
аспірант Ілля ПЕЧОНКІН;
аспірант Артем ГРЕБЕНЮК;
аспірант Михайло ДМИТРУК;
аспірант Остап МИХАЙЛІВ.

УХВАЛИЛИ: вважати дисертаційну роботу М. Д. Клена “Статистичні моделі та часова когерентність квантового світла в турбулентній атмосфері” завершеним науковим дослідженням і затвердити такий висновок.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Клена Микити Дмитровича “Статистичні моделі та часова когерентність квантового світла в турбулентній атмосфері” написана за матеріалами робіт, що виконані ним під час навчання в аспірантурі в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України (2022-2026 рр.) у відділі синергетики. Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України від 10 листопада 2022 р., протокол № 7, керівником призначено доктора наук з галузі “Природничі науки” Андрія СЕМЕНОВА.

Актуальність роботи

Квантові канали у відкритому просторі є необхідною складовою квантового зв'язку на великих відстанях. Оптичні волокна забезпечують надійну передачу на локальному та регіональному рівнях, однак для глобального масштабу єдиним практичним рішенням залишаються супутниково-наземні канали. Поширення сигналу у відкритому просторі також є невід'ємним елементом систем із рухомими

платформами та мобільними наземними станціями. В усіх подібних конфігураціях принаймні частина оптичного шляху проходить крізь атмосферу, що неминуче призводить до деградації квантового сигналу.

Одним з домінуючих джерел деградації в атмосферних квантових каналах є турбулентність, що зумовлює стохастичні флуктуації показника заломлення повітря. Статистичні властивості амплітуди поля після поширення крізь турбулентну атмосферу досліджені досить детально: явища блукання та розширення пучка, а також сцинтиляція мають добре розроблені теоретичні описи. Проте величиною, що визначає якість квантового каналу, є ефективність проходження — відношення інтенсивності світла, що потрапила в апертуру приймача, до випроміненої інтенсивності. Саме ефективність проходження є тією випадковою змінною, яка визначає квантовий стан квазімонохроматичної моди після поширення в атмосфері. Відповідно, точне знання розподілу імовірностей ефективності проходження (РІЕП) є необхідною умовою коректного опису квантового каналу.

Попри свою фундаментальну роль, РІЕП отримав значно менше систематичної уваги порівняно зі статистикою амплітуди поля. Межі застосовності наявних в літературі аналітичних моделей залишаються нечітко визначеними. Наявні моделі показали хорошу узгодженість при підгонці до експериментальних даних, проте даний метод не є достовірним, оскільки призводить до отримання зміщених оцінок параметрів. За відсутності чіткого розуміння областей придатності передбачувальна сила таких моделей суттєво обмежена.

Окрема концептуальна проблема пов'язана з припущенням про статистичну незалежність послідовних імпульсів, яке неявно закладено в стандартному підході до РІЕП. Це припущення справедливе лише тоді, коли часовий інтервал між імпульсами перевищує час кореляції атмосфери. У сучасних системах квантового зв'язку з високою частотою повторення послідовні імпульси поширюються крізь сильно корельовану турбулентність, що робить зазначене припущення некоректним. У цьому режимі часові кореляції ефективності проходження стають значущими і мають бути явно враховані в моделі. Це дозволить проаналізувати квантові протоколи з використанням заплутаних станів з урахуванням часових інтервалів між імпульсами та застосування методів постселекції.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалась у відділі синергетики Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України в рамках науково-дослідних робіт (2022–2026 рр.):

1. відомча тема відділення фізики та астрономії НАН України “Індуковані шумом динаміка та кореляції в нерівноважних системах”, Р/К 0120U101347.
2. Відомча тема відділення фізики та астрономії НАН України “Стохастичні процеси в конденсованих середовищах, біологічних системах та полях

випромінювання”, Р/К 0125U000031.

3. Проект Національного фонду досліджень України 2020.02/0111 “Некласичні та гібридні кореляції квантових систем за реалістичних умов”.
4. Проект Національного фонду досліджень України 2023.03/0165 “Квантові кореляції електромагнітного випромінювання”.
5. Проект Simons Foundation International SFI-PD-Ukraine-00014573, PI LB.

Метою досліджень, проведених у дисертації, є поглиблення розуміння статистичних властивостей та розвиток підходів до моделювання атмосферних квантових каналів з урахуванням часових кореляцій.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання:

- Розробити метод чисельного моделювання атмосферних квантових каналів, що забезпечує точне просторове та часове відтворення флуктуацій ефективності пропускання.
- Провести систематичну валідацію існуючих аналітичних моделей РІЕП у широкому діапазоні режимів турбулентності, включно зі слабкою, помірною та сильною турбулентністю, а також визначити межі їхньої застосовності.
- Дослідити статистичні властивості параметрів пучка світла з метою перевірки припущень, що лежать в основі фізично мотивованих моделей, але досі не мають достатнього обґрунтування.
- На основі отриманих результатів розробити вдосконалення аналітичних моделей атмосферних квантових каналів.
- Проаналізувати та кількісно охарактеризувати часові кореляції ефективності проходження атмосферних квантових каналів.
- Оцінити квантові властивості світла в турбулентному середовищі за реалістичних умов, зокрема дослідити збереження квантової запутаності між імпульсами, розділеними в часі, а також ефективність адаптивних методів селекції для збереження некласичних властивостей.

Серед найбільш важливих наукових результатів, отриманих у роботі, семінар відзначає такі:

- проведено систематичну валідацію аналітичних моделей РІЕП в порівнянні з чисельним моделюванням. Встановлено визначальну роль апертури приймача для визначення області застосовності моделей.
- Досліджено статистичні властивості параметрів форми пучка. Показано, що зміщення центра пучка є гаусівським, але корельованим із деформаціями пучка, а припущення про спільну гаусовість логарифмів півосей не виконується, що вказує на необхідність точнішого статистичного опису моделей РІЕП.

- Виявлено зміщення передбачення моментів ефективності проходження моделі еліптичного пучка, спричинене параметризацією через моменти форми пучка. Запропоновано метод узгодження через моменти ефективності проходження, який усуває це зміщення та забезпечує узгодженість із ключовими статистичними характеристиками каналу.
- Розроблено метод двочасової РІЕП, що враховує часові кореляції між двома імпульсами. На її основі кількісно визначено максимальний часовий інтервал між послідовними модами заплутаного стану, за якого зберігається заплутаність з урахуванням зберігання другої моди у квантовій пам'яті, а також встановлено граничний час для збереження неklasичності при використанні класичного імпульсу для тестування атмосферного каналу.

Практичне значення одержаних результатів

У роботі запропоновано критерії вибору аналітичної моделі РІЕП залежно від співвідношення радіуса апертури приймача та середнього радіуса пучка для опису атмосферних квантових каналів. Обґрунтовано перевагу бета-моделі, яка забезпечує найбільш точне відтворення результатів чисельного моделювання. Завдяки своїй аналітичній простоті та гнучкості до різних режимів турбулентності вона дозволяє здійснювати оперативний аналіз та оптимізацію квантових протоколів в умовах реальної атмосфери. Розширення опису каналу до двочасової статистики дає можливість враховувати кореляції між послідовними імпульсами у системах з високою частотою повторення та обґрунтовано вибирати частоту генерації імпульсів залежно від поставленої задачі. Показано, що за реалістичних умов атмосфера турбулентність допускає збереження заплутаності на масштабах мілісекунд, а з розвитком технології квантової пам'яті цей інтервал може бути суттєво збільшений. Це створює практичні передумови для впровадження квантових протоколів в турбулентній атмосфері, а також адаптивної селекції з попереднім класичним тестуванням каналу.

Особистий внесок здобувача

Дослідження, представлені в роботах [1,2], були проведені переважно кандидатом. Науковий керівник Андрій СЕМЕНОВ надав основні концептуальні ідеї, визначив напрямки досліджень і здійснював керування проектом протягом його виконання. Співавтори, а саме Д. Васильєв, В. Фогель, надали допомогу у вигляді плідних дискусій, які допомогли уточнити теоретичні результати та інтерпретацію модельованих даних. У статті [3] особистий внесок у дослідження полягав в адаптації чисельного методу моделювання, використаної для аналізу розподілу форми променя світла у атмосфері та проведенні валідації моделі. Крім того, розроблено техніку узгодження моментів для усунення похибок, виявлених в попередніх моделях. У роботі [4] внесок здобувача полягав у проведенні чисельного моделювання, аналізу отриманих даних та підготовці

репрезентативних матеріалів візуалізації, що склали основу представлених матеріалів.

Основні результати дисертації викладені у 4 роботах у наукових журналах:

- [1] M. Klen, A. A. Semenov. Numerical simulations of atmospheric quantum channels. *Physical Review A*, 108(3), 033718 (2023).
<https://doi.org/10.1103/physreva.108.033718> (Q1)
- [2] M. Klen, D. Vasylyev, W. Vogel, A. A. Semenov. Time correlations in atmospheric quantum channels. *Physical Review A*, 109(3), 033712 (2024).
<https://doi.org/10.1103/physreva.109.033712> (Q1)
- [3] I. Pechonkin, M. Klen, A. A. Semenov. Circular-beam approximation for quantum channels in a turbulent atmosphere. *Physical Review A*, 112(6) (2025).
<https://doi.org/10.1103/pv7j-4zpf> (Q1)
- [4] A. Semenov, M. Klen, I. Pechonkin (2025, October 29). Quantum optics in the turbulent atmosphere: fundamental issues and applications. In V. Fernandez, G. Sorelli, & S. Schwartz (Eds), *Quantum Technologies for Defence and Security II* (p. 38). *Proceedings of SPIE 13676*, 136760H-13 (2025).
<https://doi.org/10.1117/12.3069599>

Апробація результатів дисертації

Результати дисертаційної роботи доповідались на наступних семінарах та конференціях:

- [1] M. Klen, A. A. Semenov, «Free-space quantum channels: Numerical simulations»: US-Ukraine Quantum Forum 2023, 28–31 серпня 2023 р.
- [2] M. Klen, «Quantum light in atmospheric turbulence»: 25th Symposium on Photonics and Optics SPO 2024, Київ, Україна, 8 листопада 2024 р.
- [3] M. Klen, «Numerical simulations in free-space quantum channels»: стендова доповідь на конференції Quantum 2025: From Foundations of Quantum Mechanics to Quantum Information and Quantum Metrology & Sensing, Турин, Італія, 18–24 травня 2025 р.
- [4] A. Semenov, M. Klen, I. Pechonkin, «Quantum optics in the turbulent atmosphere: fundamental issues and applications»: запрошена доповідь на конференції SPIE Sensors+Imaging Meeting. *Quantum Technologies for Defence and Security II*. Мадрид, Іспанія. 15–18 вересня, 2025 р.

Характеристика особистості здобувача

Клен Микита Дмитрович закінчив у 2022 році Київський національний університет імені Тараса Шевченка за освітньою програмою “Квантові

комп'ютери, обчислення та інформація” спеціальності “Фізика та астрономія” та отримав ступінь магістра. З 2022 року навчався в аспірантурі Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України з відривом від виробництва за спеціальністю 104 – фізика та астрономія, та зараховано на посаду провідного інженера відділу синергетики ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України, основним науковим напрямком діяльності є дослідження квантових каналів у вільному просторі з використанням методів чисельного моделювання.

УХВАЛЕНО:

1. Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Клена Микити Дмитровича “Статистичні моделі та часова когерентність квантового світла в турбулентній атмосфері”.
2. Визнати, що за актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Клена М. Д. відповідає спеціальності 104 Фізика та астрономія та вимогам **Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)**, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261, пп. **6, 7, 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії**, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами). Рекомендувати дисертацію Клена Микити Дмитровича “Статистичні моделі та часова когерентність квантового світла в турбулентній атмосфері” до захисту на здобуття ступеня доктора філософії у разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія.
3. Рекомендувати вченій раді ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України затвердити склад разової спеціалізованої вченої ради:

Голова ради:

Шарапов Сергій Геннадійович, доктор фіз.-мат. наук, завідувач лабораторії сильнокорельованих низьковимірних систем Інституту теоретичної фізики Національної академії наук України.

Рецензенти:

Золотарюк Ярослав Олександрович, доктор фіз.-мат. наук, завідувач відділу синергетики Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України.

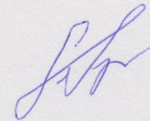
Офіційні опоненти:

Яценко Леонід Петрович, академік НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу когерентної і квантової оптики Інституту фізики Національної академії наук України.

Вілоресі Паоло (Paolo Villorresi), доктор філософії (PhD), професор, директор Падуанського центру квантових технологій (Padua Quantum Technologies Research Center) Університету Падуї (Università degli Studi di Padova), Італія.

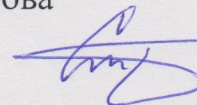
Сореллі Джакомо (Giacomo Sorelli), доктор філософії (PhD), керівник групи квантової суперроздільної здатності (Quantum Superresolution Group Leader) Інституту оптроники, системних технологій та використання зображень товариства Фраунгофера (Fraunhofer Institute of Optronics, System Technologies and Image Exploitation, Fraunhofer IOSB), Етлінген, Німеччина.

Головуючий на засіданні –
академік НАН України, доктор фіз.-мат. наук,
проф., головний науковий співробітник
відділу синергетики
Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова
Національної академії наук України.



Богдан ЛЕВ

Секретар засідання –
науковий співробітник
відділу синергетики
Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова
Національної академії наук України.



Іван СТАРОДУБ