



## БРИЖИК

**Лариса Свиридівна** – доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу теорії нелінійних процесів у конденсованих середовищах Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України

## П'ЯТДЕСЯТ РОКІВ ДАВИДОВСЬКОМУ СОЛІТОНУ

*У статті коротко описано історію відкриття солітона, розглянуто зародження і розвиток ідеї, висловленої 50 років тому відомим фізиком-теоретиком ХХ ст. Олександром Сергійовичем Давидовим, щодо використання солітонів для пояснення механізму передачі енергії в біологічних системах на макроскопічні відстані. Це явище здобуло назву давидовського солітона, 50-річчю якого було присвячено ХХІХ Давидовські читання з теоретичної фізики, що відбулися в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.*

26 грудня 2022 р. наукова спільнота відзначила 110 років від дня народження видатного фізика-теоретика Олександра Сергійовича Давидова (26.12.1912—19.02.1993), а у 2023 р. виповнилося 50 років давидовському солітону. Останній даті було присвячено ХХІХ Давидовські читання з теоретичної фізики, які відбулися в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України 21 грудня 2023 р.

Що ж таке давидовський солітон і чим він, власне, відрізняється від просто солітона?

Нагадаємо, що солітоном називають розв'язок нелінійного диференціального рівняння або системи рівнянь, який має вигляд усамітненої хвилі, локалізованої в просторі (тобто хвилі з одним максимумом), що рухається без втрати енергії, а при взаємодії з собою подібною хвилею не змінює своєї форми та швидкості.

Строго кажучи, солітони є розв'язками повністю інтегрованих нелінійних рівнянь, але фізики користуються цим поняттям у більш широкому значенні, оскільки є великий клас фізичних систем, які описуються рівняннями, хоч і не повністю інтегрованими, але близькими до таких.

Найпростіше уявити таку усамітнену хвилю, як і взагалі будь-яку хвилю, на воді. І саме на воді, як прийнято вважати, шотландський інженер-кораблебудівник Джон Скотт Рассел (1808—1882) вперше спостерігав таку солітонну хвилю і згодом задокументував це явище.

У 30-х роках ХІХ ст. в Шотландії одним із найпоширеніших засобів пересування були легкі плоскодонні судна, що курсували каналами, на які така багата ця країна. Саме каналами тоді транспортували вугілля та різні інші вантажі з глибини Шотландії до портів на березі моря, а тягли ці судна мілко-

водням запряжені коні. Одного разу Вільям Х'юстон, власник однієї з човнових компаній, мандрував каналом, коли раптом щось налякало його коня і той різко зупинився. Х'юстон помітив щось незвичайне: його човен продовжив швидко ковзати по водній поверхні без будь-якого опору з боку води і не спричиняючи ніяких турбулентних потоків на берегах каналу. Сьогодні ми називаємо таке явище акваплануванням.

Дізнавшись про цей випадок, Джон Скотт Рассел вирішив ознайомитися з цим явищем ближче, сподіваючись, що воно виявиться корисним при проектуванні суден, зокрема при переході від кінної до парової тяги. І от одного серпневого дня 1834 р. під час спостереження за рухом баржі по каналу Юніон на околицях Единбурга він помітив, як один кінь різко зупинився. У цей момент під човном у центральній його частині утворилася хвиля, яка пройшла до носової частини і сформувала там усамітнену хвилю на зразок валу заввишки близько 30–45 см, а потім «відокремилася» від баржі і продовжила рухатися вздовж каналу без зміни висоти (форми) з постійною швидкістю приблизно 14 км/год. Джон Скотт Рассел прямував слідом за цією хвилею спершу пішки, потім верхи на коні протягом кількох миль, поки не загубив її в численних поворотах каналу.

Джон Скотт Рассел був настільки вражений цим незвичайним і красивим явищем, що назвав його *Трансляційною Хвилею* (саме так, з великих літер!) і описав у статті, надрукованій у «Записках Королівського товариства». У цій публікації він навів усі згадані вище властивості, притаманні солітонам. Як зізнався згодом Рассел, «це був найщасливіший день» у його житті, і значною мірою всі його подальші дослідження стосувалися саме цього явища. У 1835 р. він уперше виступив з доповіддю про свої спостереження на засіданні Британської наукової асоціації. Інтерес до цього питання виявився настільки великим, що Асоціація прийняла рішення створити відповідну комісію і виділила кошти на проведення експериментів. До складу комісії увійшли сер Джон Робінсон, секретар Королівського товариства

Единбурга, та Джон Скотт Рассел<sup>1</sup>. Результати роботи цієї комісії неодноразово заслуховували на засіданнях Британської наукової асоціації [1]. Рассел так захопився цими дослідженнями, що збудував на задньому дворі свого маєтку спеціальний басейн довжиною близько 9 м для експериментів з *усамітненими хвилями*, як він згодом назвав відкрите ним явище.

Наукова спільнота того часу дуже недовіркою сприйняла теорію Рассела про усамітнені хвилі. Серед її критиків згадаємо Дж.Б. Ейрі, англійського астронома, математика, який тоді вивчав поведінку припливів та відпливів і вважав, що теорія Рассела суперечить теорії механіки рідин Лапласа. Інший визначний вчений того часу, Дж.Г. Стокс, відомий рівнянням Нав'є—Стокса, спочатку також не сприйняв ідею усамітнених хвиль, хоча згодом, після досліджень коливальних хвиль скінченної амплітуди, змінив свою думку.

Перелом стався в 1872 р., коли Дж.В. Буссінеск для математичного опису поведінки води на мілководді вивів рівняння, яке згодом було названо його ім'ям, а розв'язок цього рівняння підтвердив існування усамітнених хвиль [2]. Цікаво, що ця робота розпочинається словами: «Всі інженери знають про красиві експерименти Дж. Скотта Рассела та Г. Базіна щодо генерації та поширення усамітнених хвиль»<sup>2</sup>.

Наступним важливим етапом стала подібна теорія хвиль лорда Релея, який одразу підтримав ідеї Дж.С. Рассела. В 1895 р., через кілька років після смерті Рассела, Дідерік Кортевег і Густав де Вріз детально розвинули роботи Буссінеска і отримали рівняння, яке згодом назвали їхніми іменами і з якого безпосередньо випливало існування усамітнених хвиль.

Таким чином Джон Скотт Рассел започаткував народження цілої епохи досліджень усамітнених хвиль, а ХХ ст. у фізиці стало не лише ерою квантової фізики, а ще й нелінійної

<sup>1</sup> Obituary of John Scott Russel. *The Times*. June 10, 1882. [https://web.archive.org/web/20110525044607/http://members.cox.net/ggtext/johnscottrussell1809\\_obit.html](https://web.archive.org/web/20110525044607/http://members.cox.net/ggtext/johnscottrussell1809_obit.html)

<sup>2</sup> Йдеться про роботи Генрі Базіна, напр. Bazin H. Expériences sur les ondes et la propagation des remous. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*. 1862. 55: 353–357.

фізики. Як ми сьогодні знаємо, такі солітонні явища виникають у нелінійних системах (зрештою, лінійні моделі є лише їх наближеннями), а бурхливий розвиток обчислювальної техніки значною мірою полегшив їх вивчення. Власне, термін «солітон» (від англ. *solitary wave*) було введено в науковий обіг значно пізніше, аж у 1965 р. Його запропонували вчені Мартін Крускал і Норман Забусскі, які вивчали рівняння Кортевега—де Вріза і встановили, що такі хвилі існують не лише в теорії, а й у реальності і можуть бути збуджені експериментально. Їхній термін «солітон» відображає певною мірою той факт, що солітон при взаємодії з собою подібними поводить себе як квазічастинка, і спершу вчені хотіли назвати таку хвилю «солектрон» (пор. «електрон»), але виявилось, що тоді існувала фірма з такою самою назвою, тому вони зупинилися на терміні «солітон».

Ну і нагадаємо цікавий факт: 12 липня 1995 р. під час конференції з нелінійних явищ, присвяченої 65-річчю відомого британського та американського вченого Елвіна Скотта (25.12.1931—01.11.2007), яка проходила в Університеті Херіотта—Ватта (м. Единбург), вдалося запустити солітонну хвилю в тому самому каналі, де її свого часу спостерігав Джон Скотт Рассел. До речі, це була друга спроба, бо під час попередньої конференції в 1990 р. запустити солітонну хвилю в каналі так і не вдалося. Детальніше про це можна прочитати у спогадах про Олександра Давидова [3]. Нагадаємо, що саме Елвін Скотт разом з Чу та Маклафліном були авторами першого огляду з теорії солітонів [4].

Однак заради історичної справедливості зазначимо, що насправді явище усамітненої хвилі вперше, ще у 1820 р., описав італійський інженер, математик та експериментатор у галузі гідродинаміки Джорджо Бідоне з Турину в роботі [5], завдяки якій він став відомим у Європі. Про цю працю згадувалося і в науковому журналі Единбурга [6], але опис усамітненої хвилі залишився поза увагою дослідників того часу.

Сьогодні відомо, що солітони існують у різноманітних системах: власне на поверхні води, де їх вперше спостерігали, в глибоких океанічних шарах, в атмосфері, плазмі, магнетиках,

пружних системах тощо. Термін «солітон» зараз вживають у більш загальному фізичному сенсі і виокремлюють різні типи солітонів: солітон як усамітнена дзвоноподібна хвиля; кінк — солітон, у якого ліва та права асимптотики відрізняються одна від одної (наприклад, хвиля цунамі); бризери — солітони, які мають внутрішню «дихальну» структуру, та ін.

А от ідею солітонів у біологічних системах вперше висловили Олександр Давидов і Микола Кислуха 50 років тому в статті, опублікованій у 1973 р. [7]. У цій роботі автори запропонували солітонний механізм передачі енергії в біологічних системах на макроскопічній відстані. Річ у тім, що основною одиницею енергії в біологічних системах є енергія, яка вивільняється в реакції гідролізу молекули аденозинтрифосфату (АТФ) до аденозиндифосфату. Ця енергія дуже мала, лише в 20 разів більша за енергію теплових коливань при фізіологічних температурах, але використовується вона для «біологічних потреб» на макроскопічній відстані від місця самої реакції. Крім того, все це відбувається в «густозаселеній» клітині. Жоден з відомих тоді механізмів не міг пояснити сам факт такої передачі енергії, не кажучи вже про її високу ефективність. На щорічних зборах Нью-Йоркської академії наук, на яких активно обговорювали це питання, було прийнято резолюцію про «кризу в біоенергетиці» (детальніше про це див. у монографії О.С. Давидова [8]).

Олександр Давидов — чудовий фізик-теоретик, наділений надзвичайною фізичною інтуїцією, маючи вагомий доробок у фізиці твердого тіла й теорії екситонів, звернув увагу на те, що процес перенесення енергії можна значно посилити завдяки присутнім у клітинах білковим макромолекулам. Ці молекули в так званій  $\alpha$ -конформації мають вигляд спіралі, і їх періодична квазіодновимірна структура стабілізується системою гнучких водневих зв'язків уздовж трьох паралельних поліпептидних ланцюжків, тобто ланцюжків пептидних груп, кожна з яких складається з атомів водню, азоту, вуглецю та кисню. Завдяки «м'яким» водневим зв'язкам між пептидними групами в таких ланцюжках електронні чи коливальні збудження, зумовле-

ні енергією гідролізу АТФ, «деформують» ланцюжок, пептидні групи у місці такого збудження притягуються одна до одної і утворюють «деформаційну» яму, яка захоплює збудження, і разом вони утворюють зв'язаний стан у вигляді солітона. З точки зору фізики така система описується системою нелінійних рівнянь, які можна наближено звести до рівняння, відомого як нелінійне рівняння Шредінгера, яке і допускає розв'язок у вигляді солітона. Саме це й показали у своїй роботі О. Давидов і М. Кислуха [7]. І саме завдяки цій нелінійній природі квант енергії у вигляді солітонного збудження, зв'язаного з локальною деформацією ланцюжка, рухається без втрати енергії, бездисипативно від одного кінця білкової макромолекули до іншого, де й може бути використаний для вирішення тих самих «біологічних проблем».

Висловлена ідея привернула увагу не лише учнів та послідовників О.С. Давидова в Україні, а й закордонних вчених. Певну роль у цьому відіграла й особиста зустріч на одній з міжнародних конференцій Олександра Давидова зі згаданим уже вище Елвіном Скоттом, який досліджував різні застосування солітонів. Е. Скотт був вражений красою ідеї молекулярних солітонів, як їх тоді називав сам Давидов. Елвін Скотт одразу зрозумів її перспективність і долучився до вивчення молекулярних солітонів, які слідом за ним стали називати давидовськими.

Ця ідея виявилася настільки плідною, що за ініціативою Е. Скотта в 1989 р. у м. Хансгольм (Данія) за підтримки НАТО було проведено міжнародну конференцію, практично повністю присвячену питанню молекулярних солітонів, про що свідчить і сама назва конференції *Davydov's Soliton Revisited* («Перегляд давидовського солітона») [9]. Більш детально з теорією молекулярних солітонів можна ознайомитися у згаданій вище монографії О.С. Давидова «Солітони в молекулярних системах», яку кілька разів було перевидано, а також перекладено англійською мовою [8].

Подальші дослідження засвідчили, що давидовські солітони переносять не лише квант енергії, а й електрони, й існують як у білкових макромолекулах, так і в багатьох інших низь-

корозмірних молекулярних системах, як-от поліацетилен, електропровідні полімери та деякі інші матеріали. Сьогодні такі структури широко використовують у сучасних нанотехнологіях, є навіть окремий напрям «технології біомімікрії», відомий також як «біоміметика» (*biomimicring nanotechnologies or biomimetics*).

Короткому огляду історії давидовського солітона, його місця й ролі в сучасній теоретичній фізиці, прикладних застосувань було присвячено одну з доповідей на щорічних ХХІХ Давидовських читаннях з теоретичної фізики. Такі читання традиційно щороку проходять в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, який Олександр Давидов очолював з 1973 по 1988 р.

Зі вступним словом про Олександра Сергійовича Давидова на цих читаннях виступив президент Національної академії наук України, директор Інституту академік НАН України Анатолій Загородній. До програми читань, крім згаданої оглядової лекції, увійшли доповіді співробітників Інституту Сергія Перепелиці про взаємодію ДНК з поліамінами та Юрія Скрипника про трансформації зонної структури графену за рахунок домішок. Важливою частиною цього семінару стали лекції запрошених закордонних вчених — членів наукової ради Комітету нелінійної та статистичної фізики Європейського фізичного товариства: Еріка Аурелля (Erik Aurell, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden) про статистичну генетику, Масімо Верассола (Massimo Vergassola, LPENS, Ecole Normale Supérieure Paris, CNRS, France) про динаміку цитоплазматичної рідини та Ірен Джардіни (Irene Giardina, Department of Physics, Sapienza University, Rome, Italy) про нерівноважну групову поведінку зграй. Ці доповіді було виголошено в рамках ініціативи Європейського фізичного товариства щодо посилення наукових зв'язків з Українським фізичним товариством. Інформацію про ці Давидовські читання оприлюднено в бюлетені Європейського фізичного товариства<sup>3</sup>, а ознайомитися з усіма

<sup>3</sup> <https://www.eps.org/blogpost/751263/496117/The-XXIX-Davydov-Lectures-in-Theoretical-Physics-at>

доповідями, виголошеними на семінарі, можна на ютуб-каналі Інституту<sup>4</sup>.

the-Bogolyubov-Institute-for-Theoretical-Physics-of-the-National-Academy-of-Sciences-of-Ukraine-in-Kyiv  
<sup>4</sup> Davydov Memorial Lectures. December 21, 2023.  
<https://www.youtube.com/@bogolyubovinstitutefortheo9998/playlists>

*Автор висловлює щире подяку академіку НАН України В.М. Локтеву за ідею написання цього матеріалу, багаторічну підтримку й допомогу в організації та проведенні щорічних Давидовських читань, а також професору Еріку Ауреллю за участь та залучення до виступів членів наукової ради Комітету нелінійної та статистичної фізики Європейського фізичного товариства.*

## REFERENCES

### [СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Russell J.S. Report on Waves. In: *Report of the 14<sup>th</sup> meeting of the British Association for the Advancement of Science.* (York, September 1844). London: John Murray, 1845. Plates XLVII–LVII. P. 311–390.
2. Boussinesq J. Théorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées.* Deuxième Série. 1872. **17**: 55–108.
3. Brizhik L.S. No ostalsya yego soliton. In: Loktev V.M. (ed.) *Aleksandr Sergeevich Davydov – uchenyy i lichnost [Alexander Davydov – scientist and personality]*. Kyiv, 2012. P. 40–52 (in Russian). [Брижик Л.С. Но остался его солитон. В кн.: *Александр Сергеевич Давыдов – ученый и личность.* Отв. ред. В.М. Локтев. Киев: Институт теоретической физики им Н.Н. Боголюбова НАН Украины, 2012. С. 40–52.]
4. Scott A.C., Chu F.Y.F., McLaughlin D.W. The Soliton: A New Concept in Applied Science. *Proceedings of the IEEE.* 1973. **61**: 1443–1483. <https://doi.org/10.1109/PROC.1973.9296>
5. Bidone G. Experiences sur le Remou, et sur la Propagation des Ondes [Experiments on the Swell, and on Wave Propagation]. *Memorie della Reale Accademia delle Scienze di Torino* (in French). 1820. **25**: 21–112.
6. Brewster D. Edward Lumley. *The Edinburgh Journal of Science.* 1826. Vol. 1.
7. Davydov A.S., Kislukha N.I. Solitary excitons in one-dimensional molecular chains. *Phys. Stat. Sol. B.* 1973. **59**: 465–470. <https://doi.org/10.1002/pssb.2220590212>
8. Davydov A.S. *Solitons in Molecular Systems.* Springer Dordrecht, 1985. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3025-9> [Давыдов А.С. *Солитоны в молекулярных системах.* Киев: Наукова думка, 1988.]
9. Christiansen P.L., Scott A.C. (eds). *Davydov's Soliton Revisited.* Proc. NATO ARW (July 30 – August 5, 1989, Denmark). N.Y., Plenum, 1990.

Larissa S. Brizhik

*Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5668-7740>

## FIFTY YEARS OF THE DAVYDOV'S SOLITON

The paper is dedicated to 50 years of the Davydov's soliton. Short history of soliton discovery is given. Application by the famous theoretician of the XX century Olexander Davydov of soliton theory to explain the mechanism of the energy transfer on macroscopic distances is discussed. The information is given about the XXIX Davydov Memorial Readings in Theoretical Physics. Such annual readings are traditionally held at the Bogolyubov Institute of Theoretical Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Olexander Davydov was the Director of the Institute from 1973 till 1984. The XXIX Davydov Readings were dedicated to 50 years of the Davydov's soliton. Three members of the Board of the 'Nonlinear and Statistical Physics' Division of the European Physical Society took part in this seminar: Prof. Erik Aurell from the Royal Institute of Technology (Stockholm, Sweden), Prof. Irene Giardina from the Department of Physics, Sapienza University (Rome, Italy), and Prof. Massimo Vergassola from LPENS, Ecole Normale Supérieure Paris, CNRS (Paris, France). This participation was part of the initiatives dedicated by the European Physical Society to strengthening scientific ties with the Ukrainian physics community.

**Cite this article:** Brizhik L.S. Fifty years of the Davydov's soliton. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2024. (3): 102–106. <https://doi.org/10.15407/visn2024.03.102>