

І.С. ЧЕКМАН

Національний медичний університет ім. О.О. Богомольця  
бульв. Т. Шевченка, 13, Київ, 01601, Україна

РІЧАРД СМОЛЛІ

### І ЗНАМЕНИТІ «ДЕСЯТЬ ВЕРЕСНЕВИХ ДНІВ»

---

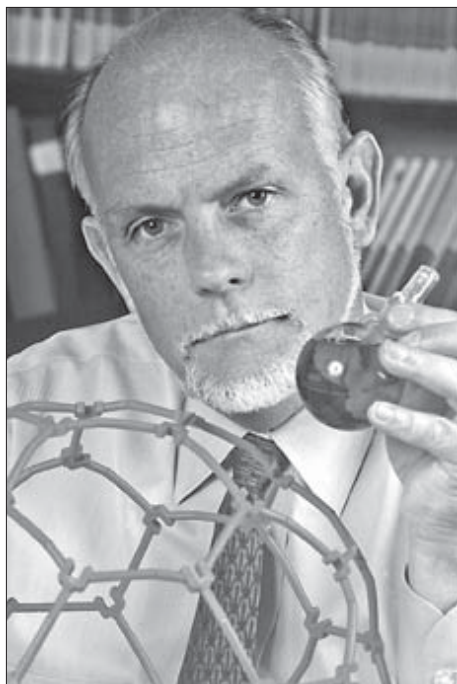
*У вересні цього року виповнюється 27 років, як було відкрито фулерен — нову сфероподібну форму вуглецю. Ця подія буквально приголомшила вчених, які на той час вважали, що про елементарний вуглець їм відомо практично все. Історія відкриття цієї речовини досить незвичайна. Ще в 1971 р. можливість існування молекули фулерену була передбачена японським ученим Е. Осавою (E. Osawa), за два роки радянські хіміки-теоретики Д.А. Бочвар і О.Г. Гальперн квантово-хімічними розрахунками підтвердили стабільність молекули  $C_{60}$ , і лише у 1985 р. Р. Смоллі, Р. Керл та Г. Крото експериментально отримали кластери із 60 атомів вуглецю в стійкій формі, яку вони пояснили структурою молекули у вигляді футбольного м'яча. Натхненнику цього відкриття, видатному вченому, нобелівському лауреату, активному популяризатору нанотехнологій Річарду Смоллі присвячено цей матеріал.*

За експериментальне відкриття фулеренів у 1985 р., встановлення їхньої хімічної структури та вивчення фізико-хімічних властивостей американським науковцям Роберту Керлу (Robert Floyd Curl, Jr.) і Річарду Смоллі (Richard Errett Smalley) та англійському вченому-хіміку Гарольду Крото (Harold Walter Kroto) у 1996 р. було присуджено Нобелівську премію з хімії. Спільними зусиллями цим дослідникам вдалося отримати експериментальні докази того, що в умовах гарячої вуглецевої плазми з найдрібніших вуглецевих фрагментів утворюються молекули  $C_{60}$ . Це відкриття — яскравий приклад для наслідування: вчені з різних країн створюють тимчасову наукову групу, залучають до проведення дослідів студентів і отримують результати світового масштабу.

Головним автором ідеї про наявність особливої структури вуглецю та ініціатором проведення дослідів був відомий учений США, професор хімії і фізики Університету Райса

(Rice University) Річард Смоллі. У нобелівській лекції він підсумував свої дослідження з виявлення фулеренів: «Як би там не було, а цього тижня віддаю данину поваги конкретному відкриттю, яке здійснилося у вересні 1985 року. <...> Основним його моментом є винайдення способу конденсації, властиві вуглецю під час утворення кластерів. <...> Для розвитку цієї концепції потрібні були нові факти та розроблення нової техніки спостережень, яка уможливила детальне дослідження властивостей вуглецевих кластерів та їх збільшення від 40 до 100 атомів» [1].

Відкриття фулерену стало можливим завдяки тому, що Г. Крото, Р. Смоллі та Р. Керл були талановитими вченими, досвідченими хіміками-експериментаторами, які не лише займалися синтезом органічних молекул, а й конструювали оригінальні прилади для вивчення та одержання нових хімічних структур. Головну роль у цьому досягненні відіграв Р. Смоллі, розробивши надзвукове джерело кластерних пучків із лазерним випаровуванням — прилад AP2, за допомогою якого дослідним шляхом було встановлено



Річард Смоллі

наявність фулеренів у шарі графіту. Отже, саме Річард Смоллі зробив визначальний внесок у створення експериментально-технічного підґрунтя для проведення таких досліджень [2]. Мав рацію Луї Пастер, коли писав: «Доля обдаровує тільки підготовлений розум».

Річард Смоллі народився 6 червня 1943 р. в Америці, у м. Акрон, штат Огайо, в інтелегентній заможній родині. Його дитинство було оповите атмосферою любові й турботи, оскільки він був четвертою і наймолодшою дитиною в сім'ї. Коли Річарду виповнилося три роки, родина переїхала в Канзас-Сіті, штат Міссурі, де він жив до 18 років, аж до вступу в коледж.

Батьки розвивали в Р. Смоллі інтерес до науки ще з дитячих років. Мати Річарда, Естер Вірджинія Роудс (Esther Virginia Rhoads), була третьою з шести дітей Шарлотти Крафт (Charlotte Kraft) і Еретта Стенлі Роудса (Errett Stanley Rhoads), заможного виробника меблів у Канзас-Сіті. Вона здобула гарну освіту, грала на багатьох

музичних інструментах, малювала, добре зналася на всесвітній історії та історії США. Від матері Річард уперше дізнався про Архімеда, Леонардо да Вінчі, Галілея, Ньютона, Дарвіна. Вона виховувала в нього любов до природи, музики, живопису, архітектури. Сина назвала Річардом на честь англійського короля Річарда I Левове Серце.

Батько — Френк Дадлі Смоллі (Frank Dudley Smalley, Jr.) — був талановитою, діяльною людиною, з аналітичним складом мислення. Йому довелося працювати за самим різним фахом, від тесляра до журналіста і видавця. Завдяки батькові син захопився технікою, навчився розбирати й складати різноманітні прилади, майструвати їх за власними проектами. Ці навички стали прекрасним підґрунтям для подальшої діяльності Річарда як експериментатора.

Поглибленому вивченню хімії допомагала Річарду молодша сестра матері, доктор Сара Джейн Роудс (Dr. Sara Jane Rhoads), яка була однією з перших жінок у США, що здобули звання професора (full professor) з хімії. У 1982 р. вона отримала медаль Американського хімічного товариства за внесок у фізико-органічну хімію. У своїй біографії Р. Смоллі згадує: «Її приклад був одним із головних чинників, що привів мене до хімії, а не фізики чи техніки. Саме на її пропозицію я вирішив вступити до Хоуп-коледжу. В цьому навчальному закладі була на той час (і залишається понині) одна з найкращих університетських програм із хімії в США». Отже, після закінчення школи Річард вступив до Хоуп-коледжу (Hope College) в Холланді, штат Мічиган. Згодом для продовження освіти він перевівся до Мічиганського університету (University of Michigan), де в 1965 р. здобув ступінь бакалавра з хімії.

Після закінчення університету Р. Смоллі працював хіміком у відділі контролю якості продукції на заводі компанії Shell Chemical Company у Нью-Джерсі, що виробляв поліпропілен. Робота йому подобалась, він багато чого навчився і набутий інженерний та організаційний досвід допоміг йому в подальших наукових дослідженнях.

Без сумніву, важливу роль у житті Річарда відіграла його дружина Джудіт Грейс Сампієрі (Judith Grace Sampieri), яка тоді працювала секретарем у компанії Shell. Р. Смоллі одружився з Джудіт 4 травня 1968 р., а 9 червня 1969 р. у них народився син.

Зацікавившись квантовою хімією, Річард у 1969 р. переходить до Принстонського університету — всесвітньо відомого наукового центру та одного з найстаріших (заснований у 1746 р.) і найпрестижніших університетів США. У магістратурі та аспірантурі Р. Смоллі вивчав властивості чистих металів та їх композитів за температури рідкого гелію. Для проведення таких досліджень потрібно було використовувати складні установки, які Річард конструював за власними проектами.

У 1976 р. Р. Смоллі обійняв посаду асистента професора хімії, фізики та астрономії хімічного факультету Університету Райса в Х'юстоні, штат Техас. У цьому університеті він працював разом з одним із найвидатніших фахівців у галузі лазерної спектроскопії Робертом Керлом. Завдяки удосконаленій пристосованій установці з мас-спектрометром учені отримали можливість за допомогою лазерного випромінювання випаровувати майже будь-яку речовину, перетворюючи її на газ, а потім охолоджувати до низьких температур. Це дало змогу вивчати особливості взаємодії атомів речовин між собою, утворення кластерів-агрегатів, що складаються з кількох атомів.

З результатами проведених досліджень ознайомився англійський хімік Гарольд Крото (Harold Walter Kroto) з університету Сассекса (University of Sussex), який вивчав можливість утворення сполук вуглецю у міжзоряному просторі. Установка Р. Смоллі давала йому змогу змодельовувати цей процес в умовах лабораторії. Тому Гарольд Крото звернувся до Роберта Керла і Річарда Смоллі з пропозицією провести спільні дослідження і дістав їхню згоду. Реалізації цих задумів сприяло також те, що у Х'юстоні знаходиться штаб-квартира Національного аерокосмічного агентства США (NASA) і

будь-які дослідження, пов'язанні з космосом, сприймалися там як актуальні й необхідні.

1 вересня 1985 р. у лабораторії Університету Райса три вчених — Р. Смоллі, Г. Крото і Р. Керл спільно зі студентами університету Ю. Лю (Yuan Liu), Ш. О'Брієном (Sean O'Brien) і Дж. Хітом (James Heath) (нині вони стали відомими вченими) розпочали експерименти з пошуку та вивчення невідомих структур вуглецю. Дослідницька група працювала цілодобово з 1 по 10 вересня. У деяких джерелах цей період називають «надзвичайною декадою», або «десять вересневих днів» [3].

Дослідники випарювали графіт за допомогою сконструйованих Р. Смоллі приладів і реєстрували мас-спектри. Вони виявили в спектрах піки, що відповідали стійким кластерам із 60 атомів вуглецю, знаменитому на сьогодні  $C_{60}$ . Під час проведених досліджень вони також установили властивість атомів вуглецю до самоорганізації в особливу структуру, яка за енергетичними характеристиками є найбільш вигідною. Такою структурою виявився зрізаний ікосаедр із 60 атомів вуглецю, який за подібністю форми іноді називають «футбольним м'ячем».

13 вересня 1985 р. результати досліджень було надіслано до журналу «Nature», а 14 листопада того ж року стаття побачила світ (Kroto H.W. et al.  $C_{60}$ : Buckminsterfullerene. *Nature* (1985) 318, 162, doi:10.1038/318162a0).

Продовжуючи дослідження, група вчених установила, що у внутрішню порожнину сферіодальної молекули  $C_{60}$  можна ввести інші речовини, зокрема лантан. Такий композит утворювався в разі одночасного випаровування вуглецю і лантану. Дані цих експериментів було покладено в основу другої наукової публікації. У третій статті було викладено результати досліджень із вивчення ролі кластерів вуглецю в утворенні сажі.

На пропозицію авторів відкриття ці дивовижні поліедричні структури з різною кількістю атомів вуглецю дістали назву фулеренів, а родоначальник цього сімейства,  $C_{60}$  — бакмінстерфулерену на честь американця



Біосфера Фуллера. Павільйон США на ЕКСПО-67, нині музей «Біосфера» у Монреалі, Канада

Річарда Бакмінстера Фуллера (1895–1983) — архітектора, математика, картографа, філософа і поета [3]. Для такого рішення у вечних були вагомими підстави.

Р.Б. Фуллеру належить надзвичайно цікаве і важливе відкриття: природа за мільйони років еволюції розробила економний принцип векторної системи побудови біологічних структур, оптимальне, ефективне, найдоцільніше співвідношення у конструюванні їхніх атомів, молекул, клітин, органів і мікро- та макроорганізмів, що забезпечує міцність, силу, стійкість, можливість взаємодії з іншими об'єктами, а також постійне функціонування величезної кількості не лише органічних, а й неорганічних структур.

Р.Б. Фуллер ввів у будівельні технології векторну геометрію, яку назвав енергетично-синергетичною геометрією (*energetic-synergetic geometry*). За цією технологією в 1958 р. в Лос-Анджелесі було зведено споруду для «Union Tank Car Company» з куполом рекордних розмірів — 117 м у діаме-

трі й 35 м заввишки; у 1959 р., в околицях Клівленда, штат Огайо — штаб-квартиру Міжнародного товариства інформації з матеріалів (ASM International — the Materials Information Society). Однак вершиною архітектурного генію Р.Б. Фуллера стали дві споруди: «Біосфера Фуллера» — павільйон США на всесвітній виставці ЕКСПО-67, побудований у Монреалі за його проектом, та павільйон «Космос — Земля» у Діснейленді. Отже, Гарольд Крото, який захоплювався графічним дизайном, запропонував назву «фулерени», згадуючи саме «Біосферу Фуллера».

Уже в 80-ті роки Річард Смоллі зі співавторами показали можливість організації структур вуглецю з числом атомів 60, а пізніше було встановлено наявність фулеренів у живих структурах. У природі є молекули, подібні до фулеренів: деякі віруси (герпесу, поліомієліту, імунodefіциту та ін.), бактеріофаги, морські одноклітинні мікроорганізми — радіолярії. Отже, фулерени є цілком природною структурою.

Вивченню властивостей фулеренів присвячено багато досліджень, чому від самого початку сприяла плідна співпраця Річарда Смоллі з іншими видатними вченими. В Мічиганському університеті Р. Смоллі працював разом з професорами органічної хімії Дж. Клейнхекселом (J. Harvey Kleinheksel) та Г. Зілом (Gerrit Van Zyl), а також з математиком Дж. Брауном (John Seely Brown) (нині він – директор компанії Xerox PARC). Результативними виявилися також спільні дослідження Річарда Смоллі зі співробітником Принстонського університету Е. Бернстейном (Elliot R. Bernstein), який вивчав оптичні та мікрохвильові властивості чистих і змішаних молекулярних монокристалів, що охолоджуються в рідкому гелії. Влітку 1973 р., працюючи над докторською дисертацією в Чиказькому університеті, Р. Смоллі разом із Дональдом Леві (Donald H. Levy) та Аланом Каррінгтоном (Alan Carrington) досліджував властивості газової фази магнітного резонансу різних молекул, у тому числі  $\text{NO}_2$ .

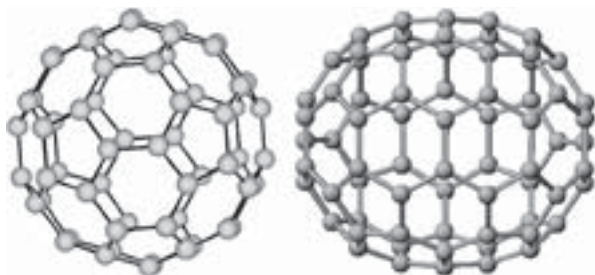
Велике значення для ефективного дослідження фулеренів мав природний талант Р. Смоллі конструювати нові прилади для вивчення властивостей хімічних структур. В автобіографії з нагоди присудження Нобелівської премії Річард Смоллі так описує створення своєї нової установки: «З апаратом AP2 ми швидко просунулися вперед у досягненні світового рекорду з обертальною охолодження багатоатомних молекул (0,17 К). Ми винайшли резонансну двофотонну іонізацію (R2PI) з тривалістю прольоту мас-спектрометричного виявлення як засіб зондування спектра молекул у надзвуковому пучку. Ми використали це, щоб дослідити структуру та молекулярну динаміку великих ароматичних молекул, зокрема, акцентуючи увагу на внутрішньомолекулярному коливальному перерозподілі. Ми також розробили спосіб отримання фрагментів багатоатомних молекул, спрямовуючи імпульсний лазер на спеціальне імпульсне надзвукове сопло, а також вивчали охолодження в надзвуковому пучку. Після кіль-

кох років інтенсивних досліджень ми знайшли спосіб використання імпульсного лазера, спрямовуючи його в сопло для випаровування матеріалу, що дало змогу вперше отримати атоми будь-якого елемента періодичної таблиці для внесення в холодний надзвуковий пучок. Найголовніше, ми розробили спосіб керування кластеризацією цих атомів у невеликих агрегатах, які потім охолоджують у надзвуковому розширенні. Тепер можна було вільно «гуляти» по періодичній таблиці і проводити детальне дослідження властивостей нанорозмірних частинок, що складаються з точного числа атомів» [4].

Після отримання Нобелівської премії у 1996 р. Р. Смоллі спрямував свої зусилля в різних наукових напрямках. Він продовжував дослідження з метою поглибленого вивчення властивостей наноматеріалів, зокрема вуглецевих нанотрубок, сприяв організації Центру нанонауки і нанотехнологій Університету Райса (Rice Center for Nanoscience and Technology – CNST), що значно підвищило міжнародний авторитет цього закладу.

Для впровадження вуглецевих надструктур (фулеренів, вуглецевих нанотрубок) у практичну діяльність людства Р. Смоллі заснував компанію «Carbon Nanotechnology».

Річард Смоллі був активним прибічником популяризації нанотехнологій. У його біографії є цікавий епізод, що стосується його взаємин з Еріком Дрекслером (K. Eric Drexler) – активістом нанотехнологій, поборником ідеї молекулярних самовідтворюваних нанороботів і керованого механосинтезу. У 1986 р. побачила світ книга співробітника Массачусетського технологічного інституту інженера Е. Дрекслера «Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology» (Машина творення: настання ери нанотехнологій), яка викликала неабиякий інтерес у вчених та інженерів. Проте на той час нанотехнології ще не знайшли свого застосування у промисловості. Річард Смоллі різко полемізував з Еріком Дрекслером. Він вказував на фундаментальні проблеми, які перешкоджають



Структура молекул фулеренів:  
C<sub>60</sub> (зліва) і C<sub>70</sub> (справа)

створенню саморозмножувальних нанороботів, і побоювався, що змальовані Дрекслером апокаліптичні картини можуть значною мірою послабити підтримку нанотехнологій у суспільстві.

У 1992 р. сенатор штату Теннессі Альберт Гор ініціював у сенаті США слухання на тему «Нові технології для стійкого розвитку». З доповідями виступили найвідоміші американські фахівці, зокрема Е. Дрекслер і Р. Смоллі. Розгляд цієї проблеми викликав гарячі дискусії, у яких не останню роль відіграла блискуча промова Річарда Смоллі. Врешті-решт на слуханнях було оголошено про створення організації – координатора досліджень з нанонауки в рамках спеціальної програми «Національна нанотехнологічна ініціатива» (NNI), яку згодом ухвалив конгрес США, виділивши на її здійснення 500 млн доларів. Щороку бюджет NNI зростає: у 2005 р. він становив 970 млн, а в 2008 р. – уже 1,447 млрд доларів. Нині NNI об'єднує головні напрями досліджень з нанотехнологій у США. Разом з тим було затверджено й інші програми з розвитку нанотехнологій.

Кінець 80-х – початок 90-х років ХХ ст. ознаменувався в усьому світі інтенсивним розвитком нанонауки: нанотехнологій, наномедицини, нанофармакології, нанофармації та інших напрямів [5–7]. Активне вивчення властивостей нановуглецевих сполук сприяє впровадженню в різні галузі народного господарства наноматеріалів, наноприладів, нанотехнологій тощо.

Крім бакмінстерфулерену C<sub>60</sub> Річард Смоллі з колегами детально описали структуру молекули фулерену C<sub>70</sub>. Вона має дві півсфери C<sub>30</sub>, розділені кільцем із десяти додаткових вуглецевих атомів. Через довгасту форму молекули C<sub>70</sub>, яка нагадує еліпсоїд, ця структура дістала назву «регбі-бол» [5, 8].

Річард Смоллі помер 28 жовтня 2005 р. після тяжкої тривалої хвороби.

Отже, знамениті «десять вересневих днів» 1985 року, впродовж яких групою дослідників на чолі з Гарольдом Крото, Робертом Керлом і Річардом Смоллі вперше було отримано фулерени, стали потужним поштовхом до інтенсивного дослідження властивостей цих нановуглецевих сполук. Сьогодні, за даними Інтернету, відомо про 8310 статей щодо C<sub>60</sub>, що свідчить про значний інтерес наукової спільноти до дослідження фулеренів. Подальше їх вивчення сприятиме глибшому пізнанню надзвичайних властивостей цих сполук та ширшому застосуванню їх у практичній діяльності людини.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Автобіографія Р. Смоллі // [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/chemistry/laureates/1996smalley-autobio.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1996smalley-autobio.html).
2. *Эрлих Г.* Золото, пуля, спасительный яд. – М.: КоЛибри, 2012. – 400 с.
3. *Чекман І.С.* Фулерени: історичні етапи відкриття // Вісник фармакології та фармацевції. – 2008. – №11 – 12. – С. 39–45.
4. *Смоли Р.Е.* Открывая фуллерены // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 168, №3. – С. 323–330.
5. *Кац Е.А.* Фуллерены, углеродные нанотрубки и нанокластеры: Родословная форм и идей. – М.: ЛКИ, 2008. – 296 с.
6. *Патон Б.Є., Москаленко В.Ф., Чекман І.С., Мовчан Б.О.* Нанонаука і нанотехнології: технічний, медичний та соціальний аспекти // Вісн. НАН України. – 2009. – № 6. – С. 18–26.
7. *Chen Z., King R.B.* Spherical aromatic: recent work on fullerenes, polyhedral borates, and relates structures // Chem. Rev. – 2005. – V. 105, N 10. – P. 3613–3642.
8. *Трефилов В.И.* Фуллерены – основа материалов будущего. – К.: АДЕФ – Украина, 2001. – 148 с.

*И.С. Чекман*

Национальный медицинский университет  
им. А.А. Богомольца  
бульв. Т. Шевченко, 13, Киев, 01601, Украина

РИЧАРД СМОЛЛИ И ЗНАМЕНИТЫЕ  
«ДЕСЯТЬ СЕНТЯБРЬСКИХ ДНЕЙ»

В сентябре этого года исполняется 27 лет с момента открытия фуллерена — новой сферообразной формы углерода. Это событие буквально потрясло ученых, которые в то время считали, что об элементарном углероде им известно практически все. История открытия этого вещества довольно необычна. Еще в 1971 г. возможность существования молекулы фуллерена была предсказана японским ученым Е. Осавой (E. Osawa), через два года советские химики-теоретики Д.А. Бочвар и Е.Г. Гальперн с помощью квантово-химических расчетов подтвердили стабильность молекулы  $C_{60}$ , и только в 1985 г. Р. Смолли, Р. Керл и Г. Крото экспериментально получили кластеры из 60 атомов углерода в устойчивой форме, которую они объяснили структурой молекулы в виде футбольного мяча. Вдохновителем этого открытия, выдающемуся ученому, нобелевскому лауреату, активному популяризатору нанотехнологий Ричарду Смолли посвящен этот материал.

*Ключевые слова: фуллерены, углерод, Ричард Смолли.*

*I.S. Chekman*

Bogomolets National Medical University  
13 Taras Shevchenko ave., Kyiv, 01601, Ukraine

RICHARD SMALLEY AND THE FAMOUS  
'TEN SEPTEMBER DAYS'

27 years since the discovery of fullerene, the new form of carbon, is observed in September of this year. This event has literally shocked scientists, who believed at that time that they know almost everything about the elementary carbon. History of this discovery is rather unusual. Long ago, in 1971 the possibility of the existence of a fullerene molecule was predicted by a young Japanese scientist E. Osawa. Then two Soviet chemists and theorists D.A. Bochvar and E.G. Halpern confirm the stability of the  $C_{60}$  molecule using quantum chemical calculations, and in 1985 at last R. Smalley, R. Curl and H. Kroto experimentally obtained clusters of 60 carbon atoms in a sustainable form. They explained the structure of this molecule as the structure of a soccer ball. This material is devoted to the inspirer of this discovery, an outstanding scientist, Nobel laureate, active popularizer of nanotechnology — Richard Smalley.

*Keywords: fullerenes, carbon, Richard Smalley.*