

ПОНОМАРЕНКО

Олександр Миколайович – академік НАН України, доктор геологічних наук, професор, академік-секретар Відділення наук про Землю НАН України, директор Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України

ШЛЯХ ВІД ФІЗИКИ ТВЕРДОГО ТІЛА ДО БІОМІНЕРАЛОГІЇ ТА ПРИКЛАДНОЇ МІНЕРАЛОГІЇ

**До 75-річчя члена-кореспондента НАН України
О.Б. Брика**

28 квітня виповнюється 75 років відомому ученому в галузі фізики мінералів, наномінералогії, біомінералогії, прикладної мінералогії, радіоспектроскопії мінеральної речовини та фізики твердого тіла, завідувачу відділу фізики мінеральних структур та біомінералогії Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, доктору фізико-математичних наук, професору, члену-кореспонденту НАН України Олександру Борисовичу Брику.

Олександр Борисович Брик народився 28 квітня 1943 р. У 1967 р. він з відзнакою закінчив Київський політехнічний інститут. З 1974 р. працює в Інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, пройшовши шлях від інженера до завідувача відділу фізики мінеральних структур та біомінералогії.

Наукову роботу О.Б. Брик розпочав ще у студентські роки. Вивчав динаміку спінових систем під керівництвом талановитого фізика-теоретика Вілена Яковича Зевіна, брав участь у наукових семінарах широко відомої київської школи радіоспектроскопії, заснованої членом-кореспондентом АН УРСР Михайлом Федоровичем Дейгеном. Уже перші статті О.Б. Брика було опубліковано в найавторитетніших фізичних журналах Радянського Союзу, таких як «Журнал экспериментальной и теоретической физики» (ЖЭТФ), «Письма в ЖЭТФ», «Физика твердого тела».

У 1974 р. О.Б. Брик під керівництвом Івана Васильовича Матяша розпочав вивчення мінеральної речовини методами радіоспектроскопії. Науковий світогляд і стиль роботи І.В. Матяша сформувалися у знаменитій харківській школі теоретичної фізики, де ще витав дух Л.Д. Ландау. Відділ радіоспектроскопії мінеральної речовини, яким керував І.В. Матяш, підтримував тісні зв'язки з різними науковими школами СРСР, особли-



Олександр Борисович Брик

во з московською школою фізики мінералів, створеною і керованою видатним мінералогом сучасності Арнольдом Сергійовичем Марфуніним. Завдяки цьому О.Б. Брик мав можливість співпрацювати з найкращими науковими колективами країни.

У 1979 р. в Інституті фізики АН УРСР Олександр Борисович успішно захистив кандидатську дисертацію на тему «Исследование динамических эффектов в двойном электронно-ядерном резонансе», а в 1988 р. — докторську «Магнитоэлектрические эффекты в кристаллах с парамагнитными примесями». Обидві роботи було захищено з фізико-математичних наук за спеціальністю «фізика твердого тіла». У 2004 р. О.Б. Брику було присвоєно вчене звання професора, а в 2012 р. обрано членом-кореспондентом НАН України за спеціальністю «нанofізика мінералів».

Тематика кандидатської дисертації О.Б. Брика виникла у зв'язку з тим, що відомий своїм широким і прогресивним мисленням перший директор Інституту геохімії і фізики мінералів АН УРСР Микола Пантелеймонович Семененко, який був тоді віце-президентом АН УРСР, зміг домогтися виготовлення та встановлення у своєму Інституті спектрометра подвійного електронно-ядерного резонансу (ПЕЯР). До вирішення дуже складних питань, пов'язаних з виготовленням найкращого на той час у світі спектрометра ПЕЯР, були також залучені М.Ф. Дейген, І.В. Матяш, М.О. Рубан, Ю.В. Федотов. Завдяки зусиллям цих талановитих та енергійних людей ідею створення унікального супергетеродинного спектрометра ПЕЯР вдалося втілити в життя. Однак застосування цього методу для вирішення мінералогічних і геологічних завдань наштовхнулося на ряд труднощів, пов'язаних зі складністю структури і властивостей природних об'єктів. Працюючи над кандидатською дисертацією, О.Б. Брик виявив і дослідив кілька нових динамічних ефектів у подвійному електронно-ядерному резонансі, а також з'ясував особливості механізмів виникнення сигналів ПЕЯР у різних кристалах. Глибоке розуміння динаміки спінових систем, а також уміння самостійно

виготовляти необхідні нестандартні експериментальні пристрої дали йому змогу вперше в СРСР застосувати подвійний електронно-ядерний резонанс для вирішення завдань мінералогії, у тому числі для відновлення умов утворення мінералів та визначення якості мінеральної сировини.

Тематика докторської дисертації О.Б. Брика була зумовлена тим, що в ті роки у світі виник великий інтерес до створення нових типів лазерів і лазерів. Учені активно шукали природні та синтетичні кристали, на яких можна було б створити інверсію населеностей енергетичних рівнів. За ініціативою І.В. Матяша у відділі розпочалися дослідження природного кварцу з метою створення інверсії населеностей енергетичних рівнів алюмінієвих центрів за допомогою зовнішніх електричних полів. Однак найцікавішим і найважливішим результатом цих досліджень виявився «побічний ефект». З'ясувалося, що електричні поля впливали на намагніченість досліджених зразків, хоча зазвичай електричні поля впливають лише на діелектричну поляризацію, а намагніченість кристалів можна змінити тільки за допомогою магнітних полів. Втім раніше Л.Д. Ландау і Є.М. Ліфшиць теоретично передбачили можливість наявності магнітоелектричного ефекту (зміна намагніченості електричним полем) для деяких кристалів з особливою магнітною і кристалографічною симетрією (згодом цей ефект експериментально підтвердив Д.М. Астров). Однак магнітоелектричний ефект, виявлений на кварці, за своїми характеристиками радикально відрізнявся від відомих магнітоелектричних ефектів. Подальші багатопланові експериментальні і теоретичні дослідження О.Б. Брика, які він виконував спільно з І.В. Матяшем, С.С. Іщенком, В.С. Вихніним і А.С. Литовченком, дозволили встановити природу виявленого явища. Його сутність полягає в тому, що за певних умов, сформульованих і обґрунтованих О.Б. Бриком, змінні електричні поля можуть стаціонарно охолоджувати систему парамагнітних центрів до спінових температур, нижчих за температуру кристалічної ґратки, що спричинює гігантське збільшення



О.Б. Брик з директором Інституту О.М. Пономаренком

намагніченості. У 1992 р. це явище було зареєстровано Академією природничих наук РФ як наукове відкриття.

Нові фізичні ефекти і явища, виявлені і вивчені О.Б. Бриком, здобули широке визнання світової наукової спільноти, що підтверджується, зокрема, великою кількістю посилань на його публікації. За матеріалами його дисертаційних досліджень О.Б. Брик зі співавторами отримали 14 авторських свідоцтв на винаходи, які застосовують у фізиці твердого тіла, матеріалознавстві, мінералогії, в тому числі для вирішення завдань зі встановлення умов утворення мінералів та якості мінеральної сировини. У 1994 р. О.Б. Брику було присвоєно звання «Кращий винахідник НАН України».

Наукова діяльність Олександра Борисовича прямо чи опосередковано пов'язана з нанофізикою мінералів, яка вивчає особливі властивості нанорозмірних мінеральних об'єктів. До таких об'єктів належать нанокластери і наночастинки, локалізовані всередині звичайних мінералів; макроскопічні наномінерали, структура яких сформована частинками, які мають розміри в діапазоні нанометрів, а також нанобіомінерали, тобто нанорозмірні мінеральні (неорганічні) частинки, формування яких пов'язане з життєдіяльністю біологічних організмів.

Аварія на ЧАЕС породила багато нових наукових проблем, одна з яких полягала у необ-

хідності інструментального визначення дози опромінення, яку людина отримала в минулому. Виявилось, що це завдання можна вирішити за допомогою такої біологічної тканини, як зубна емаль, яка на 95–97% складається з мінеральної речовини (з нанокристалів гідроксилапатиту). Визначаючи за допомогою електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) кількість радіаційних центрів в емалі, можна встановити дозу опромінення, яку людина отримала в минулому. Для ретроспективної дозиметрії місцевості, забрудненої радіонуклідами, роль матеріалу дозиметра може відіграти кварц. Досліджуючи властивості радіаційно-активованих центрів в емалі зубів і кварці, О.Б. Брик спільно з В.В. Радчуком розробили ряд нових методів і підходів, які дозволили істотно збільшити чутливість методів реконструкції доз, а також підвищити достовірність отримуваних результатів. Ефективність розроблених методик було продемонстровано під час вивчення наслідків аварії на ЧАЕС в рамках міжнародного проекту Experimental Collaboration Project «Retrospective dosimetry and dose reconstruction» (ЕСР10), який на замовлення Європейської комісії виконували науковці Великої Британії, Німеччини, США, України, Росії та Білорусі. Отримані результати щодо властивостей радіаційних центрів в емалі лягли в основу методики реконструкції дозових навантажень людини, яка офіційно була затверджена Міжнародним агентством з атомної енергії (МАГАТЕ).

Проблеми, що постали після зведення об'єкта «Укриття» над зруйнованим четвертим енергоблоком ЧАЕС, а також розвиток атомної енергетики активізували інтерес до радіаційної стійкості мінералів, гірських порід і будівельних конструкцій. За допомогою ЕПР і ядерного магнітного резонансу (ЯМР), а також рентгенофазового аналізу і комп'ютерного моделювання О.Б. Брик з колегами отримали низку важливих результатів щодо механізмів формування аморфних нановключень у структурі мінералів, які утворюються під впливом авторадіаційного опромінення (внаслідок розпаду домішок урану і торію). Визначено фак-

тори, які впливають на радіаційну стійкість мінералів, що важливо для радіаційного матеріалознавства, зокрема для вирішення проблем, пов'язаних з ізоляцією радіоактивних відходів. Під час вивчення радіаційної стійкості мінералів особливу увагу було приділено механізмам метаміктного розпаду (аморфізації при збереженні зовнішніх морфологічних форм) циркону, оскільки саме цей мінерал найчастіше використовують у геохронології для датування геологічних об'єктів.

Особливості надструктури макроскопічних наномінералів О.Б. Брик вивчав методами радіоспектроскопії і рентгеноструктурного аналізу. Визначено характеристики найтипівішого представника макроскопічних наномінералів — опалу, надструктура якого формується нанорозмірними глобулами з діоксиду кремнію та води. Методом ЯМР встановлено, що температурна стабільність і впорядкованість молекул води, які заповнюють простір між наноглобулами, у благородному опалі істотно перевищує відповідні величини у звичайному опалі. Показано, що саме водна матриця стимулює утворення кубічної гранецентрованої надструктури опалу, сформованої наноглобулами діоксиду кремнію. Результати, отримані О.Б. Бриком з колегами з визначення методом ЯМР стабільності і впорядкованості водної матриці в звичайних і благородних опалах, дають змогу здійснювати контроль технології створення синтетичних аналогів благородного опалу, який має ефект іризації.

Пошук та реєстрація окремих наночастинок, локалізованих у різних об'єктах, є досить непростим завданням. Дослідження особливих властивостей нанорозмірних мінеральних частинок, виконані О.Б. Бриком за допомогою феромагнітного та електронного парамагнітного резонансу, дозволили розробити нові методики пошуку розсіяних наночастинок, які містяться у мінералах, гірських породах, метеоритах та інших об'єктах. Ці методики, засновані на мультирезонансному поглинанні магнітними наночастинами мікрохвильового діапазону, що можна зафіксувати за допомогою феромагнітного резонансу, а



О.Б. Брик на робочому місці

також на особливостях зміни зарядового стану домішок у діамагнітних наночастинках під впливом нагрівання і опромінення, що можна зафіксувати методом ЕПР.

О.Б. Брик розробив також нову концепцію високомінералізованих біологічних тканин як мінерально-органічних наноасоційованих (МОНА) систем. Встановлено, що роль структурних одиниць МОНА-систем (як і неорганічних макроскопічних наномінералів) відіграють не окремі атоми або іони, а нанорозмірні підсистеми, що мають різний електричний заряд, який може змінюватися залежно від зовнішніх умов. О.Б. Брик показав, що завдяки механоелектричним явищам біологічні МОНА-системи перебувають у стані електрично поляризованої і механічно напруженої біотекстури. Зміни цього стану під впливом зовнішніх факторів зумовлюють (або породжують) захворювання високомінералізованих біологічних тканин.

Використовуючи ЕПР і цілеспрямовані зовнішні впливи, О.Б. Брик зі співробітниками, а також разом із Джеррі Кеннером (Jerry Kenner) з Університету штату Юта (США) розробили нові методи та підходи до вивчення фазового складу мінеральної компоненти таких високомінералізованих тканин, як кістки і зубна емаль. Ці методи основані на тому, що для визначення типу кристалічної ґратки домішкових фаз методом ЕПР, на відміну від рент-

генофазового аналізу, достатньо однієї–двох координаційних сфер навколо парамагнітного центру. Крім того, метод ЕПР має істотно вищу чутливість порівняно з рентгенофазовим аналізом, що дозволяє фіксувати домішкові мінеральні нанофази, присутні в дуже малій кількості (частки відсотка). О.Б. Брик показав, що крім фази гідроксилапатиту мінеральна компонента зазначених біологічних тканин включає в себе також домішкові мінеральні нанофази (вітлокіт, кальцит, доломіт, оксиди металів), які містяться у невеликій кількості, але відіграють дуже важливу роль у функціонуванні та захворюваннях кісток і зубів.

Інформація про фазовий склад мінеральної компоненти кісток різного типу виявилася дуже важливою для виготовлення синтетичних аналогів кісткової тканини (імплантатів), які використовують для лікування захворювань кісток. О.Б. Брик спільно з В.А. Дубком (Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України) розробили методи контролю процесів асиміляції живою кістковою тканиною імплантатів, виготовлених на основі синтетичного гідроксилапатиту. За допомогою цих методів, оснований на ЕПР, можна оцінювати ефективність процесів перетворення неорганічної (неживої) матерії імплантатів на живу біологічну тканину. Розроблені методи дозволяють оптимізувати склад і технології створення імплантатів, призначених для лікування кісток.

Фазовий склад і властивості кісток можуть змінюватися залежно від багатьох різних факторів, але найшвидше властивості кісток змінюються в умовах невагомості під час космічних польотів (космічний остеопороз). О.Б. Брик разом із В.С. Огановим (Інститут медико-біологічних проблем РАН, Москва) на рівні нанокристалів, що формують мінеральну компоненту кісток, визначили механізми демінералізації кісткової тканини в умовах невагомості. Ці дослідження було виконано на замовлення Національного аерокосмічного агентства США (NASA) і Державного космічного агентства України. На основі отриманої інформації О.Б. Брик розробив нові методики

контролю ефективності контрзаходів, спрямованих на гальмування процесів демінералізації кісток під час космічних польотів. Результати, одержані в процесі вивчення космічного остеопорозу, є важливими і для розуміння механізмів звичайного (земного) остеопорозу, за якого також відбувається демінералізація кісток.

Хоча дослідження мінеральних частинок, локалізованих у біологічних тканинах, здійснюють переважно для високомінералізованих тканин (кістки, зуби), мінеральні (неорганічні) наночастинки присутні також у багатьох слабомінералізованих тканинах, зокрема в тканинах мозку. За допомогою феромагнітного резонансу (ФМР) О.Б. Брик показав, що в тканинах мозку є ниткоподібні системи з магнітних наномінералів, які мають унікальні властивості. Він розробив якісну модель, яка пояснює виявлені властивості в припущенні, що під дією резонансного мікрохвильового поля система частинок біогенного магнетиту, локалізованого в тканинах мозку, переходить у макроскопічний когерентний квантовий стан. Унікальність цього ефекту полягає в тому, що він спостерігається за кімнатної температури, тоді як відомі макроскопічні квантові стани фіксують за низьких (азотних) або наднизьких (гелієвих) температур. О.Б. Брик розробив наукові основи технологій для створення синтетичних аналогів виявленої системи частинок біогенного наномінералізованого магнетиту, а також способи контролю переходу системи синтетичних наночастинок у макроскопічний когерентний квантовий стан. Ці результати в перспективі відкривають можливість для створення технічних пристроїв, побудованих на принципах функціонування мозку, для зберігання та обробки інформації, а також для вирішення проблем, пов'язаних зі створенням квантових комп'ютерів.

Крім зазначених вище когерентних ефектів, мінеральні включення у тканинах мозку мають низку інших цікавих властивостей. Виявилось, що магнітний стан біогенних наночастинок, локалізованих у тканинах мозку, може бути відносно просто змінений під впливом зовнішніх факторів. Зокрема, перебуваючи в мікрохвильовому резонаторі ЕПР-спектрометра,

біогенні наночастинки, можуть переходити зі слабомагнітного стану в сильномагнітний.

На численних виставках наукових досягнень Інституту стенди, присвячені біогенному магнетиту і проблемам залізородних регіонів України (Криворіжжя), як правило, розміщують поруч. Цей факт стимулював різнопланові дискусії О.Б. Брика з О.М. Пономаренком та О.О. Юшиним, у результаті яких було сформульовано завдання, пов'язане з використанням інформації про властивості біогенних залізородних мінералів для розроблення нових технологій виготовлення залізородних концентратів з бідних окиснених залізних руд та з відходів гірничозбагачувальних комбінатів. Актуальність цього завдання пояснюється тим, що на сьогодні запаси залізних руд, що легко збагачуються, на Криворіжжі значною мірою вичерпано, а технології збагачення бідних окиснених руд найчастіше виявляються малоєфективними.

Отриману інформацію про властивості біогенного та синтетичного наномагнетиту (зокрема, про фазові перетворення біогенних оксидів заліза під впливом зовнішніх впливів) О.Б. Брик використав для вирішення проблем, пов'язаних із залізними рудами. У відділі, який він очолює, було розроблено і створено обладнання для перетворення слабомагнітних мінералів (гематит, гетит), що входять до складу окиснених залізних руд та відходів гірничозбагачувальних комбінатів, на сильномагнітні мінерали (магнетит, маггеміт). Створене обладнання дозволяє перетворювати слабомагнітні мінерали на сильномагнітні у водному, сухому та газоподібному середовищі. Це обладнання, а також створене допоміжне магнітометричне устаткування захищено патентами України. За допомогою розробленого обладнання під керівництвом О.Б. Брика досліджено особливості перетворення (механізми та динаміку) магнітних властивостей оксидів та гідроксидів заліза у водному, сухому та газоподібному середовищі.

Крім фундаментального значення, перетворення магнітних властивостей залізних руд становить великий практичний інтерес, пов'язаний з виробництвом високоякісних за-

лізородних концентратів із бідних окиснених залізних руд та з відходів гірничозбагачувальних комбінатів. Для виробництва залізородних концентратів необхідно розділяти (сепарувати) рудні (оксиди і гідроксиди заліза) та нерудні (переважно кварц) мінерали. Перетворення слабомагнітного гематиту або/та гетиту на сильномагнітний магнетит розширює можливості методів магнітної сепарації залізородної сировини. Відомо, що для отримання високоякісних залізородних концентратів необхідне розкриття (механічне розділення) рудних і нерудних частинок, що потребує високого ступеня подрібнення руди і, відповідно, зумовлює появу значної кількості високодисперсних частинок як рудних, так і нерудних мінералів. Однак наявність високодисперсних частинок спричинює формування в магнітних полях так званих флокул, які є досить стійкими утвореннями з рудних і нерудних частинок. Наявність флокул суттєво ускладнює процес сепарації залізородної сировини і призводить або до зниження якості залізородного концентрату (через потрапляння нерудних частинок у концентрат), або до збільшення втрат заліза у хвостах (відходах), а також ускладнює роботу магнітних сепараторів. У традиційних технологіях високодисперсні частинки, як правило, видаляють із сировини дешламацією, але таке знешламлювання залізородної сировини пов'язане зі значними втратами рудного матеріалу.

О.Б. Брик розробив принципово нові підходи до сепарації залізородної сировини (які є найбільш перспективними для сепарації саме високодисперсних частинок) і створив лабораторний магнітний сепаратор залізородної сировини, який також працює на нових принципах. У сепараторі використовується змінне магнітне поле, яке має форму різнополярних імпульсів, розділених інтервалами часу, в яких магнітне поле дорівнює нулю. В цьому сепараторі магнітні частинки рухаються вгору (в повітря) в пучність магнітного поля. Оскільки сила, що діє на частинки, пропорційна градієнту магнітного поля в просторі, який займає частинка, наявність флокул, які складаються

з багатьох частинок та є голкоподібними системами, сприяє руху флокул угору в пучність магнітного поля. В розробленому способі флокули можна створювати спеціально за допомогою додаткового магнітного поля. Перебуваючи в повітрі, флокули, а також інші магнітні частинки (за великої коерцитивності) змінюють орієнтацію в просторі з частотою змінного магнітного поля. Швидка реорієнтація флокул завдяки відцентровим силам веде до руйнування флокул та до розділення рудних і нерудних частинок. При цьому нерудні частинки припиняють рух у пучність змінного магнітного поля, а рудні частинки продовжують цей рух. Наявність інтервалів часу, в яких змінне магнітне поле дорівнює нулю, створює ефект вібрації частинок у повітрі та поліпшує розділення рудних і нерудних частинок. Отримані результати, пов'язані з перетворенням магнітних властивостей залізних руд та сепарацією рудних і нерудних мінералів, пройшли успішну апробацію при створенні високоякісних залізородних концентратів з відходів гірничозбагачувальних комбінатів Криворіжжя.

Дослідження, що стосуються оксидів заліза та залізних руд, останнім часом виконувалися О.Б. Бриком переважно за фінансової підтримки Європейського Союзу в рамках проекту Українського науково-технологічного центру.

Останнім часом О.Б. Брик приділяє значну увагу принципово новому способу перетворення слабомагнітного гематиту на сильномагнітний магнетит у суміші гематит–крохмаль–вода. Цей спосіб пов'язаний з ланцюговою (вибухоподібною) реакцією, яка стимулюється мікрохвильовим полем. Такий спосіб перетворення гематиту на магнетит супроводжується

появою горючих газів та яскравими спалахами (вибухами), оскільки результат зазначеної ланцюгової реакції стимулює її причину. Крім того, зараз Олександр Борисович працює над розробленням нових економічно рентабельних способів отримання водню з води за допомогою оксидів заліза та мікрохвильових полів.

О.Б. Брик опублікував понад 400 наукових праць у вітчизняних та зарубіжних виданнях, у тому числі дві монографії, два навчальних посібники та понад 30 авторських свідоцтв і патентів. Під керівництвом Олександра Борисовича захищено 4 кандидатські і одну докторську дисертацію. Протягом багатьох років О.Б. Брик був членом спеціалізованих рад із захисту дисертацій при Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, а також при Київському національному університеті технологій та дизайну. Наукову роботу він успішно поєднує з педагогічною діяльністю. Багато років він викладає курс «Загальна фізика» для студентів різних кафедр Київського політехнічного інституту, курс «Спеціальні розділи фізики (основи квантової механіки, квантової статистики і фізики твердого тіла)» для студентів кафедри мікроелектроніки Київського національного університету технологій та дизайну, а зараз викладає курс «Біомінералогія» для студентів кафедри мінералогії, геохімії і петрографії Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Наукова громадськість, учні і колеги щиро вітають ювіляра і бажають йому успішної реалізації всіх його наукових ідей, міцного здоров'я, нових успіхів, благополуччя та подальшої плідної діяльності.