

Спектроскопічне вивчення електронного переходу іонів Fe^{2+} із високо- в низько спіновий стан в сидериті і літіофіліті за тисків, які мають місце в умовах нижньої мантії Землі

1. Явище електронного переходу $3d^N$ -іонів із високо- в низько спіновий стан

Згідно існуючих геофізичних і петрологічних моделей поміж перехідними металами залізо у вигляді іонів Fe^{2+} і, в меншій степені, Fe^{3+} , вважають найбільш ймовірним компонентом кристалічних порід, що складають верхню мантію, перехідну зону і нижню мантію Землі (Рис. 1).

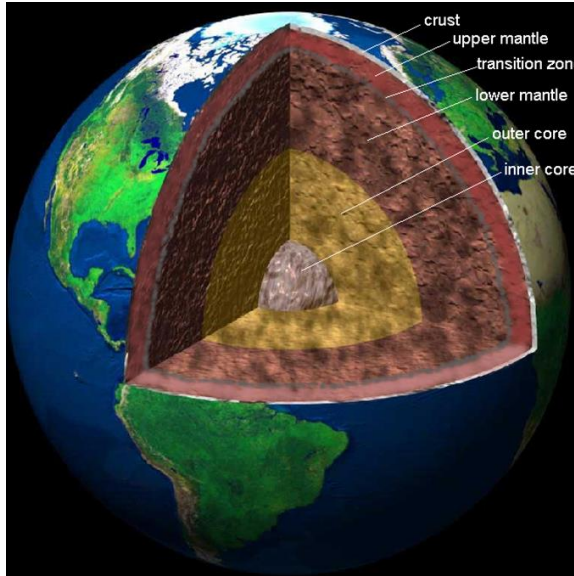


Рис. 1. Fe^{2+} і, в меншій мірі, Fe^{3+} , вважають найбільш ймовірним компонентом кристалічних порід, що складають верхню мантію, перехідну зону і нижню мантію Землі. І хоча за своєю розповсюдженістю залізо в мантії займає лише четверте місце після O, Si і Mg, складаючи всього біля 6 ат. % від загальної маси, вплив цього елемента на фізичні властивості мантії є набагато сильнішим, ніж можна було б очікувати з такого його представництва в складі мантійних порід. В силу особливостей своєї електронної будови обидва іони, Fe^{2+} і Fe^{3+} , теоретично можуть переходити із високоспінового (ВС) в низько спіновий (НС) електронний стан в умовах надвисоких тисків нижньої мантії. Вважається, що ВС-НС-переходи в Fe^{2+} і Fe^{3+} можуть суттєвим чином впливати на структуру Землі і її еволюцію.

В силу особливостей своєї електронної будови (див. нижче) обидва іони, Fe^{2+} і Fe^{3+} , теоретично можуть переходити із високоспінового (ВС) в низько спіновий (НС) електронний стан в умовах надвисоких тисків нижньої Мантії (в літературі це явище ще називають спарюванням спінів, спіновим кросовером, спіновим колапсом і магнітним колапсом). Можливість таких переходів було вперше обґрунтована В.С. Файфом у 1960 р. Вважається, що ВС-НС-переходи в Fe^{2+} і Fe^{3+} можуть суттєвим чином впливати на структуру Землі і її еволюцію. Зокрема, це явище може суттєво змінити такі важливі геофізичні характеристики Fe^{2+} - і Fe^{3+} -вмісних мінералів, які складають нижню Мантію, як пружність і електропровідність, впливати на кристалічну структуру і розподілення заліза в мінеральних фазах, їхнє часткове плавлення тощо. Крім того вважається, що зміна спінового стану іонів заліза веде до зростання щільності мінералів і, як результат, - до зниження швидкості розповсюдження сейсмічних коливань в тій частині нижньої Мантії (Рис. 1), де залізо переходить в низько спіновий стан. В результаті таких перетворень слід очікувати і на суттєві зміни в радіаційній теплопровідності мантійних порід.

Незважаючи на численні експериментальні дослідження і теоретичні розрахунки, через цілий ряд протиріч, які мають місце як між самими експериментальними даними,

так і між результатами експериментів і теоретичними викладками, ВС-НС-переходи на іонах заліза в мінералах є предметом інтенсивних дискусій. Слід при цьому зазначити, що до останнього часу більшість експериментів по вивченню ВС-НС-переходів в штучних перовскіті і феропериклазі – найбільш розповсюджених, як вважається, мінеральних фазах нижньої Мантії – були проведені переважно методами синхротронної месбауерівської і рентгено-емісійної спектроскопії. І лише в небагатьох роботах для цього був використаний метод оптичної спектроскопії. Ці результати зокрема показали, що при ВС-НС-переході в Fe^{2+} повинна знижуватися радіаційна теплопровідність зазначених вище фаз. Інші, навпаки, вважають, що в результаті індукованого тиском «синього» зсуву смуг поглинання в ІЧ-області спектру прозорість феропериклазу і силікатного перовскіту повинна збільшитися, із-за чого їхня радіаційна теплопровідність повинна зростати.

Сутність ВС-НС-переходу в мінералах і сполуках, що вмістять $3d^N$ -іони, полягає у зміні спінової мультиплетності основного електронного рівня під дією тиску. І, оскільки згідно правила Хунда спінова мультиплетність основного електронного рівня $3d^N$ -іону у вільному стані і в слабких кристалічних полях завжди максимальна для даної електронної конфігурації, зміна основного стану під впливом тиску призводить до пониження його спінової мультиплетності. Це, власне кажучи, і дало назву цьому явищу - ВС-НС-перехід. На нашу думку саме оптична спектроскопія є найбільш прямим і ефективним методом фіксації і дослідження ВС-НС-переходів іонів перехідних металів в кристалічних структурах.

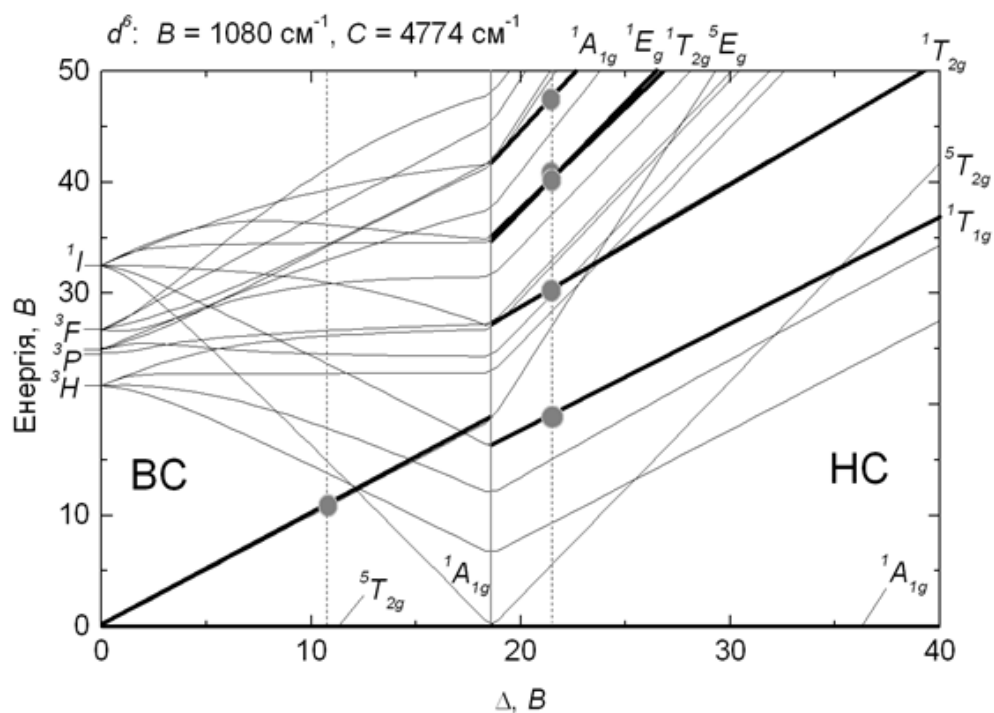


Рис. 2. Діаграма Танабє-Сугано іону перехідного металу з електронною конфігурацією d^6 (напр., Fe^{2+}) в октаєдричному кристалічному полі. Перелом електронних рівнів (показаний сірою вертикальною лінією при $\Delta/B \approx 19$), ідентифікує перехід із високо- в низькоспіновий електронний стан, при якому спінова мультиплетність основного електронного стану іону знижується від $S = 5$ до $S = 1$. Основні і збуджені стани однакової спінової мультиплетності показані масними лініями. Сірі вертикальні пунктирні лінії показують можливі значення Δ в ВС- і НС-станах іону, а темно-сірі кружки – очікувані енергії дозволених за спіном смуг поглинання в обох станах, ВС і НС.

На діаграмах Танабє-Сугано цей ефект проявляється в вигляді «перелому» електронних рівнів при певних значеннях Δ/B . Слід при цьому зазначити, що в природних кисеньвмісних мінералах і їхніх штучних аналогах НС-стан іонів перехідних металів при звичайних PT -умовах до цього часу не встановлений. За звичайних PT -умов низько-

спіновий стан іонів Fe^{2+} має місце лише в деяких штучних металоорганічних сполуках зі складними лігандами навколо Fe^{2+} . В деяких Fe^{2+} -вмісних метало-органічних сполуках кристалічне поле є близьким до «критичного». В цьому випадку зміна величини Δ за рахунок термічного скорочення міжатомної відстані R при зміні температури від кімнатної до 10 К спричинює ВС-НС-перехід і, як наслідок, різку зміну в забарвленні і конфігурації оптичних спектрів поглинання. Для кисеньвмісних мінералів і хімічних сполук гідростатичне стискування, яке зумовлює скорочення міжатомних відстаней, призводить до суттєвого зростання сили кристалічного поля Dq . А значить, при достатньо високих тисках, сумірних, як вважається, із тисками, які очікуються в нижній Мантії, значення Dq $3d^N$ -іонів з електронними d^4 -, d^5 -, d^6 - і d^7 -конфігураціями можуть сягати величин, при яких відбувається ВС-НС-перехід. Це повинно призводити до радикальних змін в оптичних спектрах таких $3d^N$ -іонів-вмісних кристалів. Так, наприклад, згідно діаграми Танабе-Сугано (Рис. 2), для Fe^{2+} у високоспіновому стані в правильній октаедричній координації слід очікувати появи лише однієї дозволеної за спіном широкої інтенсивної dd -смуги поглинання в ближній ІЧ-області, зумовленої електронним переходом ${}^5T_{2g} \rightarrow {}^5E_g$, тоді як в НС-стані в видимій і ближній УФ-області повинна з'явитися серія із п'яти дозволених за спіном смуг поглинання, зумовлених синглет-синглетними переходами ${}^1A_{1g} \rightarrow {}^1T_{1g}$, $\rightarrow {}^1T_{2g}$, $\rightarrow {}^1E_g$, Таким чином, зміни в спектрах поглинання, зумовлені ВС-НС-переходами, повинні мати чітко виражений характер і призводити до контрастних змін в забарвленні зразків. Так, наприклад, в випадку Fe^{3+} ($3d^5$ -конфігурація), ВС-НС-перехід призведе до того, що в оптичному спектрі з'являться декілька дозволених за спіном смуг поглинання, тоді як в високоспіновому стані немає жодної.

Для вимірювання оптичних спектрів поглинання була сконструйована серія саморобних однопроменевих мікроспектрофотометрів для ближньої УФ-, видимої і ближньої ІЧ-областей спектру, які в процесі використання постійно покращувалися і модернізувалися. Останнім в цій серії є автоматизований прилад, сконструйований на основі оптичного монохроматора SpectraPro-275 з трьома змінними дифракційними ґратками 1200, 600 і 300 штрих/мм, суттєво модернізованого поляризаційного мікроскопу МИН-8 і персонального комп'ютера (Рис. 2).



Рис. 3. Однопроменевий мікроспектрофотометр для вимірювання спектрів поглинання мінералів в УФ-, видимій і ближній ІЧ-областях спектру.

Мікроскоп був доповнений фотометричним пристроєм, який складався зі змінної за розміром вхідної ірисової і набору різних за діаметром (від 0,1 до 2 мм) вихідних дзеркальних діафрагм, що дозволяло вимірювати спектри зразків розміром від $\sim 20 \times 20 \mu\text{m}^2$. Пара ультрафіолетових об'єтивів Ultrafluars 10 \times слугували об'єктивом і конденсором. В якості змінних фотодетекторів в приладі використані два електронних фотопомножувачі, ФЭУ-108 і ФЭУ-62, і PbS-фотоопір, охолоджуваний до температури -20°C за допомогою ефекту Пельтьє. Разом з трьома змінними дифракційними ґратками це дозволяє вимірювати оптичні спектри в широкому спектральному діапазоні від ~ 280 до 2500 нм ($\sim 35700 - 4000 \text{ см}^{-1}$). Механічний модулятор (300 ґц), високо стабілізований по частоті за допомогою оригінального джерела змінної напруги з опорним кварцовим стабілізатором частоти, електронний вузькосмуговий підсилювач і синхронний детектор застосовуються для покращення співвідношення сигнал/шум при вимірюванні спектрів в ближній ІЧ-області $1000\text{-}2500 \text{ нм}$, а також, в вигляді додаткової опції, у випадку вимірювання спектрів дуже малих зразків, в області від ~ 350 до 1000 нм . За основними характеристиками, зокрема за мінімальним розміром досліджуваних зразків (10 мкм у діаметрі), прилад не поступається відомим зарубіжним як серійним, так і саморобним мікроспектрофотометрам, а по деяких параметрах навіть їх перевищує.

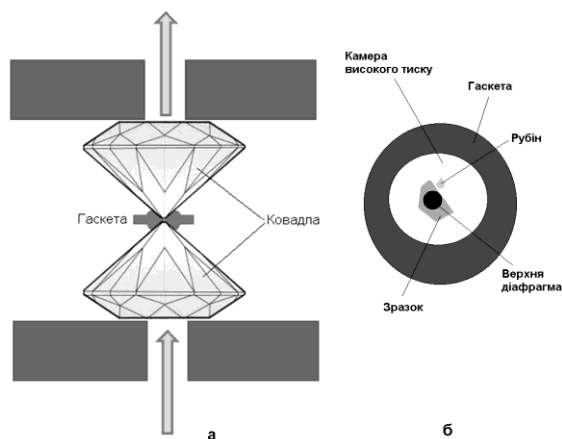


Рис. 4. а – Схематичне зображення збірки з алмазними ковадлами і металевою гаскетою в камері високого тиску. Стрілками показано вхідний і вихідний пучок монохроматичного світла при вимірюванні оптичних спектрів поглинання; б – Вид в окулярі мікроскопа мікроспектрофотометра в режимі вимірювання $I(\lambda)$.

Спектри поглинання при надвисоких тисках до $\sim 80 \text{ ГПа}$ вимірювали з використанням камер конструкції piston-cylinder Mao-type (Рис. 4) і Boehler-Almax-type - з алмазними ковадлами із діаметром робочої поверхні $250 \mu\text{m}$. Зовнішній вид такої камери показаний на Рис. 5.



Рис. 5. Камера надвисокого тиску конструкції piston-cylinder Mao-type.

Гаскетами в таких експериментах слугували плоскопаралельні пластинки із ренію товщиною 200 μm . Діаметр циліндричного отвору, пробуреного методом іскрового різання в центрі відбитку товщиною біля 25 μm , складав 100 μm . Розмір зразка у вигляді полірованої плоско-паралельної пластинки товщиною ~ 10 μm був біля 20×20 μm^2 . В якості гідростатичної рідини застосовували зріджені аргон або неон. Величину тиску оцінювали по величині зсуву R_1 -лінії люмінесценції мікроскопічного (~ 5 μm в діаметрі) зерна штучного рубіну, розміщеного в камері високого тиску поруч зі зразком, що вивчався (Рис. 4 б). Механічне стиснення алмазних ковадл здійснюється чотирма пластинчатими пружинами, що, окрім можливості досягнення значно більш високих тисків, дозволяє суттєво зменшити вагу і габарити таких пристроїв. Остання обставина особливо важлива при вимірюванні спектрів поглинання за допомогою мікроспектрофотометру, де робочі відстані на столику мікроскопу обмежені фокусними відстанями об'єктиву і конденсора.

2. Сидерит FeCO_3

Явище різкої зміни в оптичних спектрах іону Fe^{2+} і спричиненому ним забарвленні під дією тиску вперше спостерігали в сидериті FeCO_3 , який наряду з іншими карбонатними фазами системи $\text{CaCO}_3 - \text{MgCO}_3 - \text{FeCO}_3$ зараз розглядається як потенційне вмістилище карбону в нижній Мантії, причому, вважається, що іони заліза відіграють фундаментальну роль в поведінці цих мінералів в умовах високих тисків і високих температур. Така різка зміна забарвлення сидериту (в тонких, товщиною біля 10 μm пластинках) від безколірного при атмосферному тиску до густо-зеленого і темно-червоного при тисках від 50 до 70 ГПа була вперше описана в 2009 році. Це явище було віднесено до ВС-НС-переходу іонів Fe^{2+} і підтверджене методом рентгенівської дифракції як різке зниження об'єму елементарної комірки без зміни просторової групи симетрії кристалічної структури. Було також встановлено, що ВС-НС-перехід має місце у відносно вузькому діапазоні тиску від 44 до 45 ГПа. З того часу ВС-НС-перехід в сидериті інтенсивно вивчали як експериментально, так і теоретично.

Окрім цікавого явища переходу іонів Fe^{2+} із ВС- в НС-стан, яке спостерігається в високобаричних оптичних спектрах сидериту, експериментальні дані, отримані до цього, залишали вплив надвисоких тисків на дозволених за спіном, а тим більше, на заборонених за спіном смуги поглинання іонів $^{61}\text{Fe}^{2+}$ у високоспіновому стані практично не вивченим. Більш того, загалом можна знайти не так багато робіт з вивчення баричної поведінки dd -смуг поглинання в природних і штучних Fe^{2+} -вмісних мінералах за тисків вищих ніж ~ 12 -15 ГПа. З огляду на ці обставини нами були проведено додаткове вивчення оптичних спектрів сидериту в широкому спектральному діапазоні від ~ 28500 до 5000 cm^{-1} при тисках до ~ 70 ГПа.

Для високобаричних оптико-спектроскопічних вимірювань був використаний природний сидерит складу $(\text{Fe}_{0.91}, \text{Mn}_{0.09})\text{CO}_3$ із колекції мінералогічного музею ІГМР ім. М.П. Семененко НАНУ. Із нього були виготовлені зразки у вигляді полірованих з обох боків плоскопаралельних пластинок товщиною ~ 10 μm в площині спайності $\{1011\}$. Для генерації надвисоких тисків були використані два пристрої високого тиску з алмазними ковадлами DAC-1 і DAC-2. Перший експеримент, DAC-1, був проведений при тисках до 44,5 ГПа з використанням в якості гідростатичної рідини зрідженого аргону. Другий, DAC-2, при тисках до 71 ГПа, - рідкого неону. Розміри вивчених зразків в обох випадках були біля 20×20 μm^2 .

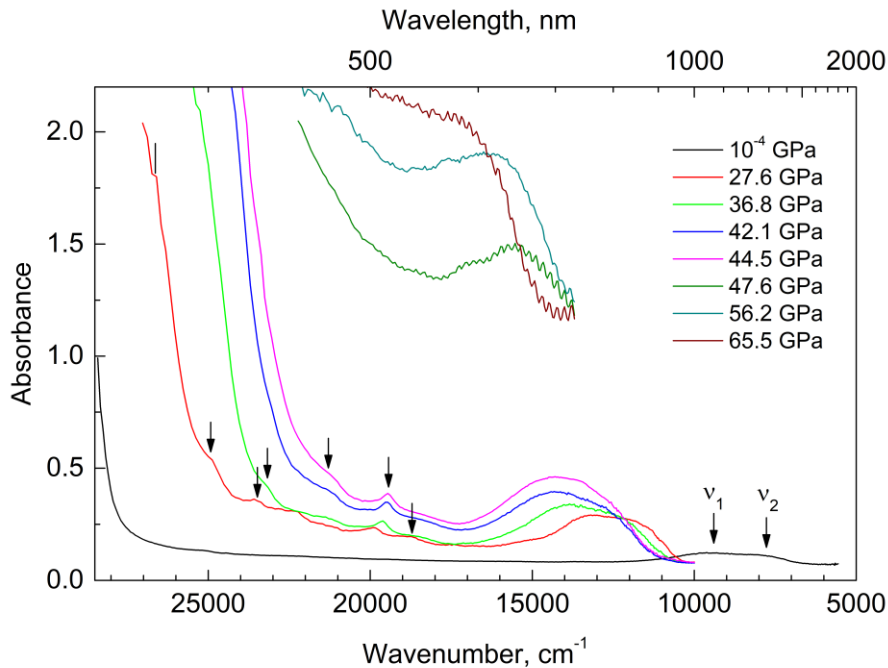


Рис. 6. Оптичні спектри полірованої пластинки сидериту товщиною біля 10 μm за різних тисків. Стрілками показані дозволені і заборонені за спіном смуги поглинання Fe^{2+} за тиску 27,6 ГПа.

Отримані оптичні спектри поглинання сидериту при тисках від 10^{-4} до 65,6 ГПа приведені на рисунку 6. Як видно із рисунку, за атмосферного тиску, 10^{-4} ГПа, в спектрі проявляються лише короткохвильовий край поглинання з енергією біля 28000 cm^{-1} і широка дублетна смуга поглинання в ближній ІЧ-області від ~ 10000 до $\sim 7500 \text{ cm}^{-1}$, позначена на рисунку як смуги ν_1 і ν_2 . Розкладення на гаусіани дає значення енергії цих двох компонент 9402 і 7724 cm^{-1} , відповідно, середнє - 8563 cm^{-1} . Оскільки за кімнатного тиску край поглинання і дозволені за спіном смуги ν_1 і ν_2 знаходяться далеко за межами видимого діапазону, при товщині в $\sim 10 \mu\text{m}$ зразок виглядав абсолютно безколірним. Відзначимо також, що окрім краю поглинання і дублетної смуги ν_1 і ν_2 ніякі заборонені за спіном смуги за такої товщини зразка не проявляються.

Зі збільшенням тиску край поглинання зміщується в бік нижчих енергій, тоді як дозволені за спіном смуги ν_1 і ν_2 зміщуються в протилежному напрямку, суттєво підсилюючись за інтенсивністю. Крім того, в видимому діапазоні проявляється серія із восьми відносно слабких заборонених за спіном смуг іону $^{61}\text{Fe}^{2+}$, позначених на рисунку стрілками. Найімовірніше, ці смуги зумовлені забороненими за спіном електронними переходами із основного рівня $^5T_{2g}$ на збуджені рівні, що виникають в результаті розщеплення кристалічним полем електронного 3H -терму іону Fe^{2+} . Так само, як і дозволені за спіном смуги, при стискуванні заборонені смуги значно підсилюються за інтенсивністю, і злегка зміщуються в бік нижчих енергій. Однак зі збільшенням тиску кількість таких смуг, які можна спостерігати в спектрах, різко зменшується через те, що вони поступово перекриваються інтенсивним краєм короткохвильового поглинання, який швидко зміщується в видиму область.

Оскільки і край поглинання і зростаючі за інтенсивністю дозволені за спіном смуги іону $^{61}\text{Fe}^{2+}$ поступово зміщуються з обох боків, УФ і ближнього ІЧ, відповідно, в видиму область, зразок поступово забарвлюється в невиразні сіруваті кольори, інтенсивність яких зростає зі зростанням тиску. За тиску в 42,1 ГПа і, тим більше, 44,5 ГПа, забарвлення набуває злегка синюватого відтінку. Як видно із рисунку 10, ситуація кардинально змінюється в діапазоні тисків від 44,5 до 47,6 ГПа, таким чином підтверджуючи явище переходу іонів Fe^{2+} в НС-стан. В спектрі, виміряному при 47,6 ГПа, заявляється накладена

на край поглинання широка інтенсивна смуга з максимумом біля 15600 cm^{-1} , віднесена в до дозволеного за спіном електронного переходу ${}^1A_{1g} \rightarrow {}^1T_{1g}$ в октаедричних іонах Fe^{2+} в HS-конфігурації. Схоже на те, що ця смуга має дублетну структуру, оскільки в ній проявляється ще і слабо виражений перегин біля 16800 cm^{-1} . Забарвлення зразку при цьому стає темно-зеленим.

З подальшим підвищенням тиску до $56,2\text{ ГПа}$ край поглинання знов зміщується в бік низьких енергій, тоді як максимум дозволеної за спіном смуги ${}^1A_{1g} \rightarrow {}^1T_{1g}$ іонів Fe^{2+} зміщується в високоенергетичну область до $\sim 16400\text{ cm}^{-1}$, порівняно з 15600 cm^{-1} при $47,6\text{ ГПа}$. Тепер дозволена за спіном смуга проявляється лише як широкий перегин, накладений на край поглинання. Колір зразка змінюється при цьому на темно-червоний. За наступного значення тиску, $65,5\text{ ГПа}$, червоне забарвлення стає ще густішим, майже чорним. Дозволена за спіном смуга іонів Fe^{2+} проявляється на тлі краю поглинання лише як широкий розмитий перегин з центром біля 17500 cm^{-1} .

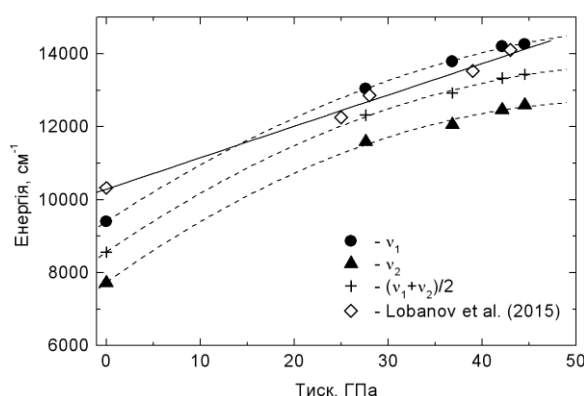


Рис. 7. Енергії v_1 і v_2 максимумів двох компонент розщеплення дозволеної за спіном смуги поглинання іонів ${}^{6}\text{Fe}^{2+}$ в ВС-стані в спектрах сидериту, отримані шляхом розкладення на гаусіани, як функції тиску. Для порівняння показані результати Lobanov et al. (2015), апроксимовані лінійною функцією $\nu\text{ (cm}^{-1}\text{)} = 10291 + 86P$ (суцільна лінія).

Індукований тиском зсув дозволених за спіном смуг іонів Fe^{2+} в обох спінових станах, ВС і HS, в сидериті в бік вищих енергій (Рис. 7) є очікуваним з позицій теорії кристалічного поля, згідно якому розщеплення кристалічним полем Δ є функцією середньої відстані Fe-O в FeO_6 -октаедрі. Енергії двох розщеплених компонент дозволеної за спіном смуги, v_1 і v_2 , отримані шляхом розкладення спектрів на складові гаусіани, показані на рисунку 11 як функції тиску.

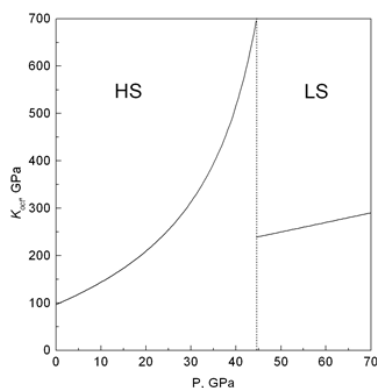


Рис. 8. Величина октаедричного об'ємного модуля стиснення FeO_6 -октаедра, як функція тиску в високоспіновому (HS) і низькоспіновому (LS) стані іону Fe^{2+} .

Із виразу для октаедричного модуля стиснення структурного поліедра можна вивести вираз для k_{oct}^{spectr} як функції тиску P для Fe^{2+} як у ВС-, так і НС-стані (Рис. 8). Як видно із рисунку, для Fe^{2+} у ВС-стані величина k_{oct}^{spectr} нелінійно залежить від P і швидко збільшується від 97 ГПа при атмосферному тиску ($P=0$ ГПа) до ~ 700 ГПа при тиску 44,5 ГПа. Зокрема видно, що під дією тиску жорсткість структурного FeO_6 -октаедра стрімко зростає, особливо при наближенні величини Δ до «критичного» значення, а при ВС-НС-переході різко падає до ~ 240 ГПа і затим практично лінійно і відносно повільно зростає при подальшому збільшенні тиску до 280 ГПа при $P=65,5$ ГПа – найбільшому значенні тиску, за яким в спектрах поглинання ще можна було розрізнити і оцінити енергію смуги ${}^1A_{1g} \rightarrow {}^1T_{1g}$ іону Fe^{2+} в НС-стані.

3. Літіофіліт $LiFe[PO_4]$

Літіофіліт має олівіноподібну кристалічну структуру, в якій роль іону кремнію в тетраедричній позиції виконує іон P^{5+} , М1-октаедри з точковою симетрією зайняті літієм, а іони Fe^{2+} і Mn^{2+} входять в позицію М2 з точковою симетрією t . В цій роботі був вивчений зразок Р95 складу $Li(Fe_{0.708}Mn_{0.292})PO_4$. Раманівські спектри літіофіліту (Рис. 9), зняті за різних тисків, свідчать, що окрім зсуву ліній в бік вищих енергій, суттєві зміни в загальній конфігурації відбуваються при $P \approx 75,6$ ГПа.

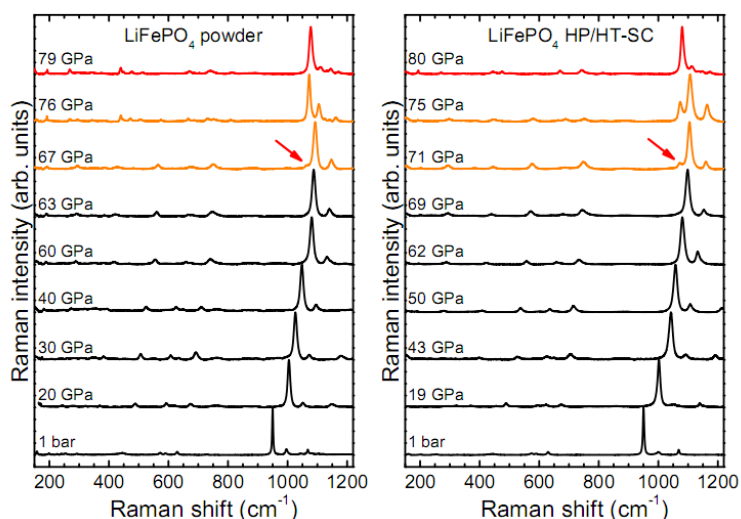


Рис. 9. Раманівські спектри двох зразків $LiFePO_4$, А і В, за різних тисків. В обох зразках червоні стрілки вказують на появу нової раманівської лінії при тисках вище приблизно 67 і 71 ГПа.

Як результат, в області тисків від ~ 67 до 79 ГПа безколірний зразок набуває все більш інтенсивного синього забарвлення (Рис. 10).

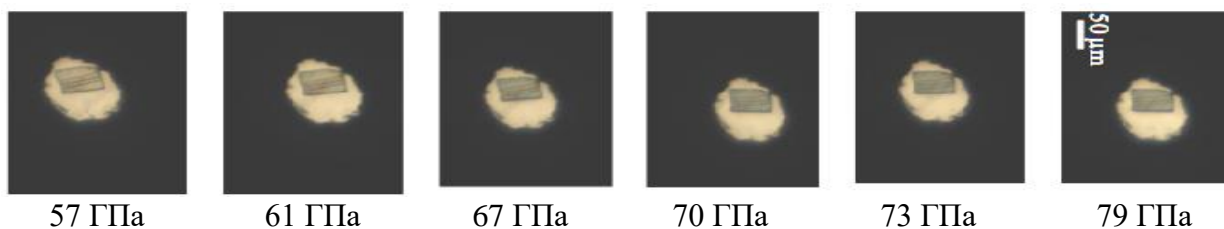


Рис. 10. Зміна кольору зразка літіофіліту Р95 з ростом тиску.

В оптичному спектрі (Рис. 11) зростає короткохвильовий край поглинання і з'являється широка інтенсивна смуга з максимумом при 6360 cm^{-1} . Все це свідчить про радикальні зміни в електронній будові іону Fe^{2+} , індуковані гідростатичним стискуванням, які свідчать про ВС-НС-перехід цього іону в літіофіліті.

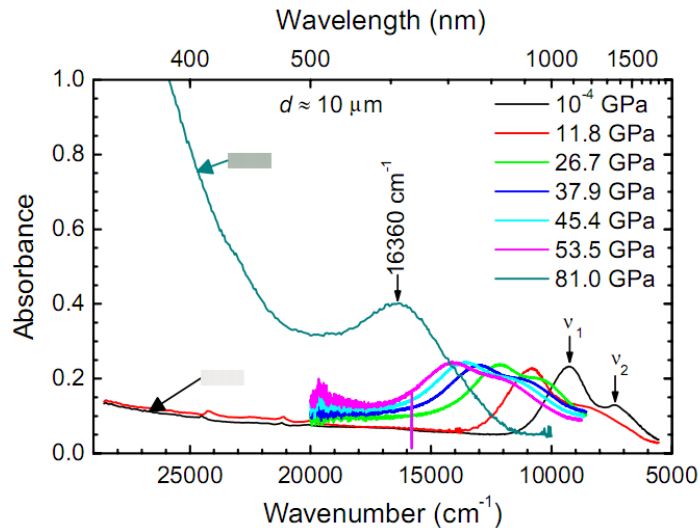


Рис. 11. Оптичні спектри поглинання полірованого зразка природного трифіліту P95 товщиною біля $10\text{ }\mu\text{m}$ за різних тисків. Кольорові прямокутники представляють HTML кольори, вираховані зі спектрів за тисків 10^{-4} ГПа і $81,0$ ГПа для стандартного освітлювача С в колориметричній системі МКО 1931.

Якщо порівнювати два мінерали, сидерит і літіофіліт, то величина октаедричного модуля в першому значно вища, ніж в другому. Тобто жорсткість структурного FeO_6 -октаедра по відношенню до гідростатичного стискування в сидериті значно вища, ніж у літіофіліті. В обох мінералах розщеплення збудженого електронного ${}^5\text{E}_g$ -рівня іону Fe^{2+} залишається практично незмінним в усьому діапазоні тисків, що в цілому не збігається з загально прийнятою думкою про те, що при гідростатичному стисненні кристалічної структури ступінь спотворення структурних поліедрів зменшується.

Поведінка ультрафіолетового краю поглинання і смуг поглинання заборонених за спіном електронних переходів іону Fe^{2+} в обох мінералах також суттєво відрізняється. Можливо це пов'язано з тією обставиною, що в обох випадках кристалографічна орієнтація зразків не уточнялася, і при інших орієнтаціях результат міг бути дещо іншим. Різниця в зміні забарвлення при збільшенні тиску може бути частково зумовлена різними товщинами вивчених зразків.

На останок привожу фотографій, зроблені під час мого перебування в Центрі геологічних досліджень в м. Потсдам, ФРГ, де при виконанні даних проектів виконувалася частина дослідів.

Section 4.3: Visiting guest scientist:

Prof. Dr. Mikhaylo M. Taran

Head of the Department of optical spectroscopy
and luminescence of minerals
Institute of Geochemistry, Mineralogy and
Ore Formation, Kyiv
National Academy of Sciences of Ukraine



He was very sceptic in the beginning , if we could reach
such high pressure

„The mechanisms of pressure-induced high-spin to low-spin transition
of Fe²⁺ in mantle minerals“

Section 4.3: Visiting guest scientist:

Prof. Dr. Mikhaylo M. Taran

Head of the Department of optical spectroscopy and luminescence of minerals
Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation, Kyiv
National Academy of Sciences of Ukraine

With the help of Hanni and Jan he reached
65 GPa (about 2000 km depth in the earth)
in a Diamond-anvil cell.
He is now back in Kyiv teaching his
new skills to his colleagues.

