

УДК 551.520.32

Інфрачервоні молекулярні емісії в лімбових спостереженнях верхньої атмосфери Землі (огляд)

А. К. Федоренко, В. М. Івченко

Національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

Надійшла до редакції 09.07.96

Узагальнено результати космічних експериментів по дослідженню ІЧ-випромінювання лімба верхньої атмосфери Землі. Розглянуто основні молекулярні смуги, проаналізовано зміни інтенсивності смуг в залежності від умов спостережень (освітленості Сонцем, висоти, геомагнітної активності). Необхідність систематизації даних досліджень ІЧ-спектру випромінювання іоносфери виникла у зв'язку з розробкою проекту «Попередження». Метою проекту є детальне вивчення збурень іоносфери, пов'язаних з сейсмічною активністю, в тому числі і за допомогою спостережень емісій іоносфери в оптичному та ІЧ-діапазонах.

Останнім часом проблема попередження землетрусів привертає увагу вчених багатьох країн. В світлі нових знань про зв'язок літосфери з іоносферою та магнітосферою проблема попередження землетрусів виходить на якісно новий рівень. На сьогоднішній день з достовірністю можна стверджувати, що іоносфера реагує на прояви сейсмічної активності. Відгук іоносфери проявляє себе у зміні параметрів, які реєструються як наземними засобами, так і з космічних апаратів (Ружин и др., 1993). На основі аналізу відомих на сьогоднішній день даних можна виділити основні типи змін іоносферних параметрів, які можуть бути передвісниками землетрусів (Коцаренко та ін., 1995): варіації магнітного та електричного полів, зміни густини іоносферної плазми в E - та F -шарах, висипання та варіації потоків частинок у магнітосфері, збурення електромагнітних хвиль наднизької та дуже низької частот, зміна інтенсивності світіння іоносфери. Велика різноманітність проявів сейсмічних ефектів у іоносфері та їх недостатня вивченість не дозволяють вказати на найбільш вірогідні параметри, які могли б слугувати передвісниками землетрусів.

Національне космічне агентство України розпочало розробку та підготовку космічного проекту «Попередження». Головна мета цього проекту — створення космічної системи моніторингу іоносфери з метою пошуку передвісників землетрусів. На першому етапі проекту «Попередження» передбачається запуск у 1999 р. космічного комплексу, що складатиметься з головного супутника та двох субсупутників. Одним із завдань проекту є пошук можливих передвісників землетрусів у ІЧ-діапазоні випромінювання іоносфери Землі. Експеримент з моніторингу молекулярних ІЧ-емісій готується в ГАО НАНУ на базі розробленого Фур'є-спектрометра (Мороженко та ін., 1995). Спектральні вимірювання передбачається проводити під час сканування лімбу атмосфери у діапазоні тангенційних висот приблизно 50, 70 до 200 км, діапазон спектру λ 1—20 мкм. Геометрія лімбових спостережень дозволяє реєструвати слабкі потоки випромінювання у верхній атмосфері Землі за рахунок великої протяжності шляху променя зору. Хоча концентрації випромінюючих молекул низькі, на довгому шляху променю зору (порядку 1000 км і більше) набирається достатня кількість квантів для ство-

рення потоків, які можна зареєструвати за допомогою сучасних приладів. Ефект самопоглинання на цих висотах для більшості речовин (за винятком смуги CO_2 λ 15 мкм) незначний (Caledonia et al., 1985). Тому, незважаючи на значні труднощі реалізації цього методу спостережень (особливо наведення приладів на тангенційну точку), метод сканування лімба широко використовується для дослідження ІЧ-випромінювання верхньої атмосфери Землі (Stair et al., 1985, 1983; Adler-Golden et al., 1991; Ahmadjian et al., 1990). Спостереження емісії в надирі в ІЧ-діапазоні неможливі через потужне випромінювання поверхні Землі та нижніх шарів атмосфери.

ІЧ-діапазон не розглядався до цього часу з точки зору пошуку сейсмічних ефектів. Дані щодо оптичних попередників землетрусів теж дуже обмежені і це лише наземні спостереження (Parrot, 1995). Слід вказати на цікаві результати, отримані в Абастуманській обсерваторії (Fishkova et al., 1983): на основі узагальнення даних, отриманих на протязі двох років спостережень, зареєстровано явище зміни інтенсивностей заборонених емісій кисню, а саме: підсилення інтенсивності зеленої лінії [OI] 0.5577 мкм (6.9 ± 1.4 %) і послаблення червоної лінії [OI] 0.630 мкм (15 ± 3 %) за декілька годин перед початком землетрусів.

В діапазоні λ 1—20 мкм знаходяться коливально-обертальні смуги молекул CO_2 , O_3 , NO , OH , H_2O , O_2 . Обертальні стани розділені малими енергетичними проміжками (порядку 10^{-3} еВ) (Бейзер, 1973). За рахунок збудження цих станів виникають обертальні спектри випромінювання або поглинання, які знаходяться в області довжин хвиль 0.1—1 мм і більше або хвилових чисел 100—10 см^{-1} і менше. Таким чином, чисто обертальні рухи характеризуються лініями в далекій ІЧ-області. Коливальні стани розділені більшими енергетичними інтервалами (порядку 0.1 еВ). Разом з колюванням збуджується і обертання молекул. Виникають коливально-обертальні спектри, що знаходяться в ІЧ-області. Для збудження коливально-обертальних станів необхідні енергії в 10—100 разів менші, ніж для збудження електронних станів (електронні спектри розташовані у видимій та УФ-ділянках спектру електромагнітного випромінювання). Тому є підстави сподіватись, що ефекти, обумовлені сейсмічною активністю (якщо такі вдасться зареєструвати) проявлятимуть себе у більш значній мірі в ІЧ-області, ніж у видимому діапазоні. Щоб виділити зміни в спектрі, які обумовлені сейсмічною активністю, треба докладно знати поведінку емісійних смуг у даному діапазоні (1—20 мкм) в залежності від умов спостереження (освітлення ат-

мосфери Сонцем, геомагнітна активність) і на різних висотах. В зв'язку з цим виникла необхідність узагальнення результатів ряду космічних експериментів, які проводились з метою дослідження ІЧ-спектру атмосфери.

Домінуючими молекулярними смугами в даній області довжин хвиль і тангенційних висот 70—200 км є смуги CO_2 (ν_2) близько 667 см^{-1} (15 мкм), O_3 (ν_3) близько 1042 см^{-1} (9.6 мкм), NO ($\Delta\nu = 1$) близько 1876 см^{-1} (5.3 мкм) і CO_2 (ν_3) близько 2349 см^{-1} (4.3 мкм).

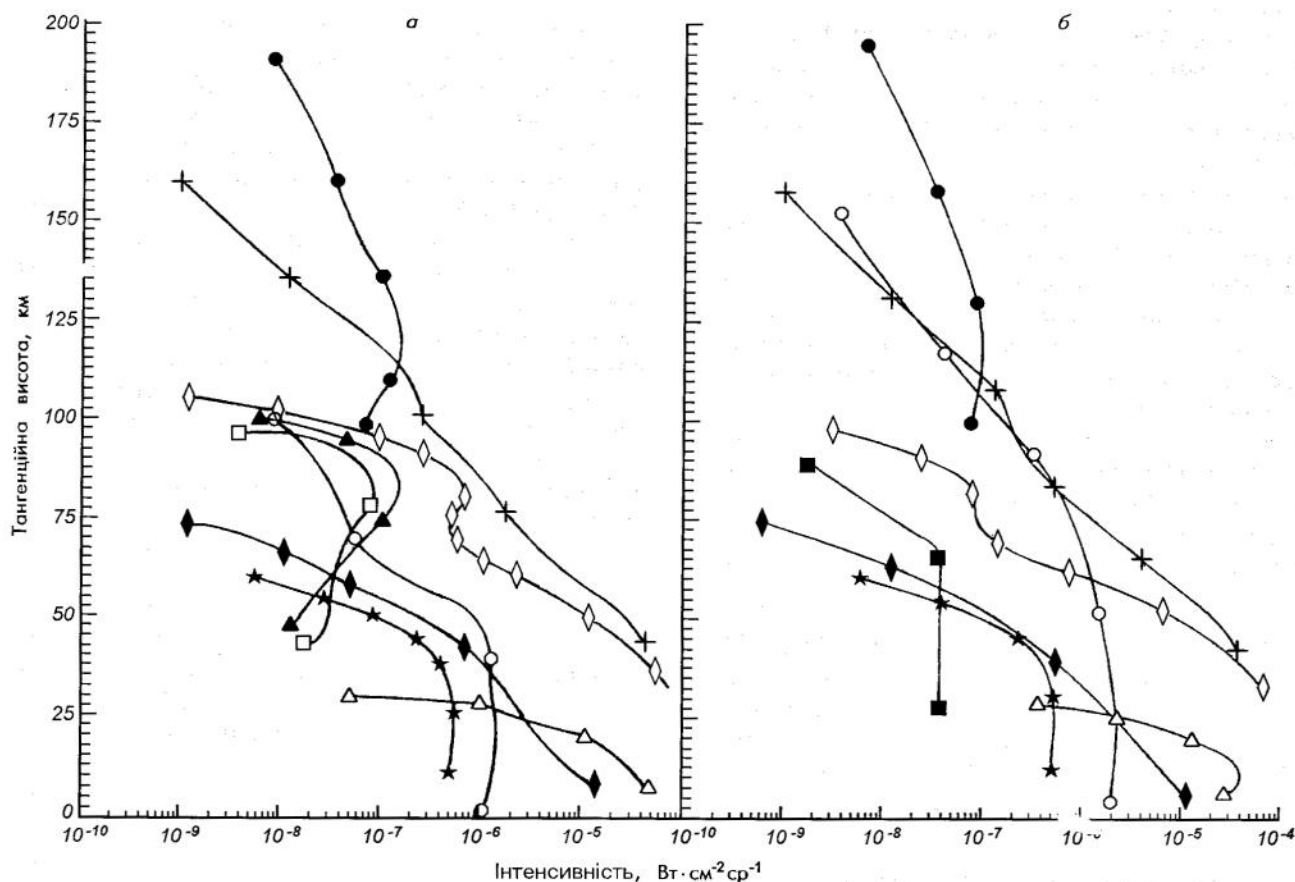
Розглянемо більш докладно особливості емісійних спектрів, отриманих під час сканування лімбу верхньої атмосфери Землі в різних експериментах.

ЕМІСІЇ CO_2

Вдалось спостерігати декілька атмосферних емісійних смуг CO_2 . Найбільш інтенсивна емісія λ 15 мкм. Типові спектральні інтенсивності, отримані в експерименті SPIRE (Stair et al., 1985) для нічних умов складають від $9 \cdot 10^{-11}$ $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}$ (на тангенційній висоті близько 170 км) до величин близько $2 \cdot 10^{-8}$ $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}$ (на 86 км) (докладніше див. у табл. 1). Денні потоки дещо нижчі (до 30 %), але в цілому добові варіації потоку незначні. Хоча смуга CO_2 λ 15 мкм спостерігалась до висот 250 км, але для кількісних розрахунків спектри, отримані вище 160—170 км виявились непридатними через швидке погіршення відношення сигнал/шум, починаючи приблизно з цих висот і вище (Smith, 1988). З іншого боку, молекулярна смуга CO_2 λ 15 мкм зазнає відчутного впливу ефекту самопоглинання на тангенційних висотах нижче 100 км під час лімбових спостережень за рахунок швидкого збільшення концентрації CO_2 (Caledonia et al., 1985). Тому для смуги CO_2 λ 15 мкм лімбові вимірювання можна вважати оптично тонкими вище 100 км. Таким чином, оптимальним інтервалом тангенційних висот для дослідження емісії CO_2 (ν_2) є 100—160 км. Слід звернути увагу на те, що в різних експериментах існують деякі розбіжності відносно даних для потоку на λ 15 мкм. Так, потоки на λ 15 мкм, отримані в експериментах SPIRE та SPIRIT 1 досить добре узгоджуються вище 105 км, але нижче цієї висоти SPIRIT 1 дає потоки, інтенсивніші приблизно у два рази (Adler-Golden et al., 1991). Ця розбіжність може бути обумовлена як просторовими варіаціями (широтні і сезонні зміни в концентрації CO_2), так і авроральною активністю, адже експеримент SPIRIT 1 проводився в умовах підвищеної авро-

Таблиця 1. Основні результати експерименту SPIRE

Тангенційні висоти, км	Умови спостереження	Довжина хвилі, мкм (хвильове число, см^{-1})	Речовина	Шумовий еквівалент спектральної інтенсивності, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}$	Спектральна інтенсивність, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}$
74	день	1.58 (6320)	O ₂	$2 \cdot 10^{-11}$	$9 \cdot 10^{-11}$
74	день	2.70 (3700)	CO ₂ + H ₂ O	$7 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-10}$
74	день	4.30 (2349)	CO ₂ (ν_3)	$2 \cdot 10^{-12}$	$1.5 \cdot 10^{-8}$
80	день	4.30 (2349)	CO ₂ (ν_3)	$2 \cdot 10^{-12}$	$1.5 \cdot 10^{-8}$
80	день	5.30 (1876)	NO(1-0)	$3 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-9}$
80	день	9.60 (1042)	O ₃ (ν_3)	$5 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-9}$
80	день	15.0 (667)	CO ₂ (ν_2)	$1 \cdot 10^{-11}$	$4.5 \cdot 10^{-8}$
80	ніч	1.5—2.4	OH($\Delta v = 2$)	$10^{-11} - 10^{-12}$	$10^{-11} - 10^{-10}$
80	ніч	2.5—3.5	OH($\Delta v = 1$)	$3 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-10}$
80	ніч	4.30 (2349)	CO ₂ (ν_3)	$2 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-10}$
80	ніч	5.3 (1876)	NO(1-0)	$3 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-9}$
80	ніч	9.60 (1042)	O ₃ (ν_3)	$5 \cdot 10^{-11}$	$7 \cdot 10^{-9}$
80	ніч	15.0 (667)	CO ₂ (ν_2)	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-8}$
124	ніч	5.3 (1876)	NO(1-0)	$3 \cdot 10^{-11}$	$7 \cdot 10^{-10}$
124	ніч	15.0 (667)	CO ₂ (ν_2)	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-9}$



Залежність інтенсивностей молекулярних смуг від тангенційних висот: *а* — для нічних умов; *б* — для умов освітлення Сонцем. Темні ромби — H₂O (ν_2) λ 6.1 мкм, точки — NO ($\Delta v = 1$) λ 5.3 мкм, трикутники — HNO₃ (ν_3) λ 11.4 мкм, кружки — CO₂ (ν_3) λ 4.3 мкм, хрестики — CO₂ (ν_2) λ 15 мкм, світлі ромби — O₃ (ν_3) λ 9.6 мкм, зірочки — O₃ ($\nu_1 + \nu_3$) λ 4.8 мкм, світлі квадрати — OH ($\Delta v = 1$) λ 3.3 мкм, темні квадрати — CO₂ + H₂O λ 2.7 мкм

ральної активності, а також деякими технічними причинами.

Емісія CO_2 на 4.3 мкм демонструє дуже сильну залежність від освітлення Сонцем. Експериментальний потік CO_2 λ 4.3 мкм (інтегрований від 4.12 до 4.49 мкм), отриманий в експерименті SPIRE, показано на рисунку (а — для нічних умов та б — для денних умов) як функцію від тангенційної висоти. Як видно, на тангенційній висоті близько 80 км денний потік λ 4.3 мкм майже на два порядки інтенсивніший, ніж нічний. Хоча денні сканування здійснювались для умов «низького» Сонця (зенітний кут Сонця змінювався в межах 75° – 85°), але атмосфера була освітлена Сонцем вздовж всього променя зору в атмосфері (Nebel et al., 1994). Така велика відмінність між нічними і денними групами даних вказує на вирішальну роль сонячного випромінювання у збудженні станів CO_2 , що обумовлюють емісію λ 4.3 мкм. Показано (James, Kumer, 1973), що сильна денна емісія λ 4.3 мкм обумовлена флюоресценцією. Переходи $101 \rightarrow 100$ та $201 \rightarrow 100$, збуджені поглинанням сонячних фотонів на λ 1.6, 2.0 та 2.7 мкм, дають основний вклад у денну емісію CO_2 λ 4.3 мкм. Слід звернути увагу також на особливість розподілу емісії λ 4.3 мкм по висоті. Як для денних, так і для нічних сканувань спостерігається перегин висотно-го профілю потоку на тангенційній висоті близько 43 км. Нижче цієї висоти потік не змінюється, незважаючи на експоненційне збільшення концентрації CO_2 зі зменшенням висоти. Це пояснюється значним самопоглинанням вздовж лінії зору на нижчих висотах.

Емісія CO_2 λ 2.7 мкм спостерігалась лише вдень, вона являє собою суперпозицію ν_1 та ν_3 основних смуг води і $\nu_1 + \nu_3$ комбінаційних смуг CO_2 . Було встановлено, що сонячна «накачка» рівнів $2\nu_1 + \nu_3$ та $3\nu_1 + \nu_3$, яка супроводжується флуоресценцією до ν_1 та $2\nu_1$ відповідно, дає більш значний вклад у емісію CO_2 ніж резонансні переходи (Sharma, Wintersteiner, 1985).

ЕМІСІЯ NO

Головна емісійна особливість NO у даному діапазоні довжин хвиль (λ 1–20 мкм) — це основна смуга з центром на λ 5.3 мкм. Профілі розподілу інтенсивності основної смуги NO по тангенційних висотах, отримані в експерименті SPIRE для денних і нічних умов показано на рисунку. Приблизно на 120 км спостерігається максимум потоку. Кількісні розрахунки для смуги λ 5.3 мкм нижче

100 км не проводились внаслідок спотворення вимірювань більш інтенсивним сигналом від CO_2 на λ 15 мкм, що виникав на кінці попереднього сектора обертального фільтра. Детектор (Ge:Si), що використовувався в цьому експерименті, має тривалу сталу діелектричної релаксації, тому слабкіші сигнали, що слідували безпосередньо після сильних, спотворювались. Слід наголосити, що потоки, виміряні в експерименті SPIRIT 1, приблизно в 4 рази слабкіші, ніж отримані в SPIRE, хоч форми профілів подібні (Adler-Golden et al., 1991). Відмінність у потоках NO λ 5.3 мкм може бути обумовлена різною концентрацією атомів O, молекул NO, різною кінетичною температурою або певними технічними причинами. Якісно нові результати були отримані в експерименті CIRRIS-1A з борту космічного корабля STS-39 28–30 квітня 1991 р. Спектр, отриманий в цьому експерименті в області основної смуги NO (1650 – 2050 cm^{-1}) для тангенційних висот від 115 до 190 км, демонструє ряд спектральних особливостей з короткохвильового боку смуги (Smith, Ahmadian, 1993). Частоти цих особливостей, відстань між якими близько 31 cm^{-1} , добре узгоджуються з моделлю для R-вітки голів смуг NO $\Delta v = 1$ послідовності для коливальних станів $v' = 1$ –10. Голови смуг спостерігались як для денних, так і для нічних умов. Наявність цих смуг потребує дуже високого ступеня обертального збудження ($J \approx 60$ – 90). В спектрі з високою роздільністю (1.04 cm^{-1} FWHM) видно лише перші дві голови смуг через наявність дуже сильної емісії основної смуги. За допомогою спеціальної обробки даних було виключено вплив основної смуги. Після цього вдалось ідентифікувати $v' = 1$ –10 голів смуг у авроральному випадку та $v' = 1$ –9 для денних умов. Для спокійних нічних умов спостерігались голови смуг до $v' = 7$, однак інтенсивність нічних смуг приблизно на порядок слабша, ніж денних. Обертальна енергія, необхідна для утворення голів смуг, становить від 1.5 до 1.0 еВ для v' від 1 до 9 відповідно. З урахуванням коливальної енергії 2.1 еВ для $v' = 9$ сумарна енергія складає 3.1–3.6 еВ для денних умов. Для авроральних умов, коли спостерігалось 10 голів смуг, необхідна загальна енергія 3.3–3.8 еВ. В обох випадках сумарні величини енергії близькі до граничної енергії реакції



яку розглядають як основний механізм походження NO у термосфері. Ця реакція була запропонована для пояснення попередніх лабораторних (Rawlins et al., 1989) та ракетних авроральних спостережень

R-вітки голів смуг (Espy et al., 1988). Реакція (1) має достатню енергетику для пояснення спостережень CIRRIS-1A, але залишається незрозумілим походження високого ступеня обертального збудження NO.

ЕМІСІЇ ОЗОНУ

В SPIRE емісії озону спостерігались на λ 9.6 мкм (ν_3 основна смуга) та на 4.8 мкм ($\nu_1 + \nu_3$ комбінаційна смуга). Основна смуга ν_1 на λ 9.1 мкм на два порядки слабкіша за ν_3 і в цьому експерименті не спостерігалась. Основна смуга $O_3 \nu_2$ виникає спектрально близько до $CO_2 \lambda$ 15 мкм основної смуги, і тому «перекривається» набагато більш інтенсивною емісією. Емісійна смуга озону на 9.6 мкм спостерігалась в SPIRE приблизно до 100 км тангенційних висот. Виділяється пік емісії на тангенційній висоті близько 80 км. На цій висоті величина денного потоку становить приблизно 1/6 від нічного (рисунок). Зменшення потоку під час освітлення атмосфери Сонцем обумовлене зниженням концентрації озону за рахунок фотодисоціації (Adler-Golden et al., 1992).

Емісія 4.8 мкм від $\nu_1 + \nu_3$ комбінаційної смуги озону не спостерігалась вище 60 км.

ЕМІСІЇ ОН

В нічному спектрі, отриманому в експерименті SPIRE, чітко видно основні смуги ОН ($\Delta\nu = 1$) з максимумом поблизу λ 3 мкм та послідовність смуг обертонів ОН ($\Delta\nu = 2$) між $\lambda\lambda$ 1.5 та 2.4 мкм. В експерименті CIRRIS-1A, крім основних колиально-обертальних смуг ОН між $\lambda\lambda$ 2.5 та 4 мкм, було вперше ідентифіковано чисто обертальні емісійні лінії в інтервалі $\lambda\lambda$ 10—25 мкм (Dodd et al., 1994), обумовлені переходами від високозбуджених обертальних станів ОН ($\nu = 0-2$, $J \leq 33$). Всі спостережувані емісії ОН демонструють дуже сильну залежність від освітлення Сонцем. Вони приблизно на порядок слабші вдень, ніж вночі на тих самих тангенційних висотах. Крім значних добових варіацій, інтенсивності емісій ОН як колиально-обертальних смуг, так і чисто обертальних ліній сильно залежать від тангенційних висот. Так, чисто обертальні лінії ОН не спостерігались нижче 80 км і вище 110 км. Складається враження, що обертально-збуджений гідроксил зосереджується у вузькому по висоті шарі в області мезопаузи. Ефективно випромінюючий об'єм мусить мати ще

менші розміри по висоті, якщо врахувати, що поле зору інтерферометра складало близько 15 км у тангенційній точці. Тому спостережувані інтенсивності смуг ОН дуже чутливі до кута зору детектора і точне визначення тангенційних висот має вирішальне значення у випадку дослідження емісій ОН (Dodd et al., 1993a). Попередній аналіз показує (Smith et al., 1992), що пік потоку для чисто обертальних ліній знаходиться на висоті 85—90 км, що на 3—5 км вище, ніж відповідний максимум для основної смуги ОН (2.5—4 мкм).

ЕМІСІЇ ІЗОТОПІВ

У верхній атмосфері речовини з низькою концентрацією відіграють основну роль у формуванні ІЧ-емісій. Якщо атмосфера в частоті смуги молекулярної емісії стає оптично товстою, то інші другорядні спектральні особливості, такі як гарячі смуги, смуги-супутники та емісії ізотопів можуть давати більший вклад у загальний потік випромінювання. Наприклад, у випадку смуги $CO_2 (\nu_3) \lambda$ 4.3 мкм емісії ізотопів, таких як $^{13}CO_2$ (1.1 %), ^{18}OCO (0.4 %) та ^{17}OCO (0.07 %) не відповідають процентному вмісту цих складових у CO_2 . Для нічних лімбових спостережень на тангенційній висоті 70 км обчислення за допомогою пакету The Strategic High-Altitude Radiance Code (SHARC) (Sharma et al., 1989) приводять до висновку, що другорядні ізотопи CO_2 дають 2/3 від загального спостережуваного потоку у смузі $CO_2 (\nu_3)$, хоча складають менше 2 % від загальної концентрації молекул в основному стані. Це припущення було підтверджене аналізом спектральних даних, отриманих в експериментах SPIRE (Wintersteiner et al., 1992) та CIRRIS 1A (Winick et al., 1992). В роботі Dodd et al. (1993) проаналізовано спектральні дані в області смуги $CO \lambda$ 4.7 мкм для тангенційних висот 70—150 км, отримані в експерименті CIRRIS 1A. Вперше було ідентифіковано основні колиально-обертальні емісії ізотопів $^{13}C^{16}O$ та $^{12}C^{18}O$. Спостережувані потоки від ізотопних складових $^{13}C^{16}O$ (1.11 % від загальної концентрації молекул CO в основному стані) і $^{12}C^{18}O$ (0.204 %) виявились у 30 разів більш інтенсивними, ніж можна було сподіватись, опираючись лише на концентрації ізотопів. Значний вклад другорядних ізотопів у загальний потік CO може бути обумовлений двома факторами. По-перше, самопоглинання зменшує інтенсивність основного ізотопу $^{12}C^{16}O$ вздовж лінії зору більш ніж у два рази на нижчих висотах. По-друге, збудження колиального рівня $\nu = 1$ ІЧ-випромінюванням від Землі більш інтенсивне для друго-

рядних ізотопних складових, ніж для $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ (Winnick et al., 1993). Вдень вклад другорядних ізотопів у загальний потік CO менший, оскільки збудження рівня $v = 1$ для всіх ізотопів (і для основного також) обумовлене переважно сонячним випромінюванням. Тому відносний вклад другорядних ізотопів у загальний потік CO збільшується вночі і зі зменшенням тангенційних висот.

Таким чином, у спектральному діапазоні $\lambda\lambda$ 1—20 мкм вдалось спостерігати смуги емісії багатьох молекул. Залежність інтенсивностей випромінювання спостережуваних молекулярних смуг від висоти показано на рисунку (a — для нічних умов і b — для умов освітлення атмосфери Сонцем) (Stair et al., 1985). Як видно, інтенсивність смуги NO λ 5.3 мкм спадає з висотою повільніше, ніж для смуг інших речовин. Хоча механізми формування сейсмоіоносферних ефектів попередження вивчені ще недостатньо, але останнім часом більшість вчених віддають перевагу їх електромагнітній природі (Липеровский и др., 1992). Тобто, сейсмоіоносферні ефекти пов'язані з аномальними електричними полями, які виникають в іоносфері перед землетрусами. Тому цікаво розглянути, як впливає наявність електричного поля на інтенсивність ІЧ-випромінювання молекул. Сочнев, Тулинов (1980) представили розрахунки висотних профілів інтенсивностей випромінювання для молекул NO λ 5.3 мкм, CO₂ λ 4.3 мкм, N¹⁴N¹⁵ λ 4.4 мкм без врахування та з врахуванням паралельного електричного поля. При наявності поля розрахунки дають помітне збільшення інтенсивності ІЧ-випромінювання для всіх розглядуваних молекулярних смуг. Але особливо помітно збільшується інтенсивність випромінювання для смуги NO λ 5.3 мкм. Тобто, смуга NO λ 5.3 мкм виявляється найбільш чутливою до зміни електричного поля. Тому молекулу NO можна вважати перспективною речовиною щодо пошуку можливих іоносферних ефектів попередження землетрусів, якщо ці ефекти дійсно мають електромагнітну природу. Крім того, процес утворення NO залежить від збудження молекул азоту (Мишин и др., 1992). Наявність додаткового джерела збудження (потоки електронів чи електричні поля) призводить до значного збільшення концентрації NO і, відповідно, величини емісії.

Нижче наводиться короткий огляд найвдаліших космічних експериментів по вимірюванню ІЧ-емісій від лімба атмосфери. Основні результати узагальнено в табл. 1—4.

1. Експеримент SPIRE (вересень 1977)

SPIRE (Spectral Infrared Rocket Experiment) здійснено з метою отримання ІЧ-спектру від лімба

атмосфери Землі. Два ІЧ-спектрометри з криогенним охолодженням вимірювали емісійний спектр в діапазоні $\lambda\lambda$ 1.40—16.5 мкм під час 12 вертикальних сканувань лімба (тангенційні висоти від 0 до 250 км). Сканування включали денний і нічний сектори. Основні параметри спектрометрів SPIRE:

	Довгохвильовий спектрометр	Короткохвильовий спектрометр
Спектральний діапазон	3.7—6.8 мкм 8.7—16.5 мкм	1.40—2.56 мкм 2.40—4.52 мкм
Роздільна здатність	0.115—0.293 мкм	0.026—0.054 мкм
Динамічний діапазон	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$
Поле зору	$1.2 \cdot 10^{-5}$ ср	$1.7 \cdot 10^{-5}$ ср

Дані взято з роботи (Stair et al., 1985). Основні результати, отримані в експерименті, подано в табл. 1.

2. Експеримент SPIRIT 1 (квітень 1986)

Експеримент SPIRIT 1 (Spectral Infrared Interferometric Telescope) було здійснено з метою вимірювання емісійного ІЧ-випромінювання атмосфери в умовах підвищеної авроральної активності. Вимірювання проводились за допомогою 5-детекторного інтерферометра Майкельсона під час сканування лімба атмосфери в діапазоні тангенційних висот 70—240 км на широтах 60°—65° N. Розглядався спектральний діапазон 450—2500 см⁻¹. Здійснювались довгі (9 с) з роздільною здатністю 1 см⁻¹ та короткі (1 с) з роздільною здатністю 8 см⁻¹ сканування. Комбінований динамічний діапазон (за рахунок всіх 5 детекторів) складав 10⁸ (Adler-Golden, 1991). Деякі результати цих спостережень подано в табл. 2.

3. Експеримент CIRRIS 1A (квітень 1991)

Експеримент CIRRIS 1A (Cryogenic Infrared Radiance Instrumentation for Shuttle) проведено з борту космічного корабля STS-39 з метою дослідження атмосферних емісій від лімба у спектральному діапазоні $\lambda\lambda$ 2.5—25 мкм для висот від 0 до 260 км. Головні датчики: інтерферометр-спектрометр Майкельсона (шумовий еквівалент спектральної інтенсивності $3.7 \cdot 10^{-14}$ Вт·см⁻²ср⁻¹см на 700, поле зору 0.93°×1.5°) і мультиспектральний радіометр (шумовий еквівалент інтенсивності $7 \cdot 10^{-11}$ Вт·см⁻²ср⁻¹, поле зору 1.2°×0.1°) (Bartschi et al., 1992). Деякі результати, отримані в експерименті, подано в табл. 3.

4. HIRIS (April 1976)

Експеримент HIRIS (High-Resolution Interferometer Spectrometer) проведено в умовах підвищеної авроральної активності з метою зареєструвати авроральне підсилення випромінювання в ІЧ-діапазоні. Основний вимірювальний прилад — інтерферометр-спектрометр Майкельсона, охолоджуваний

рідким He до 10 K. Характеристики системи HIRIS: апертура — 2.54 см, поле зору — 45 мрад (2.58°), спектральний діапазон — 455—2500 см^{-1} (4—22 мкм), роздільна здатність — 1.8 см^{-1} , період сканування — 1.36 с/скан, динамічний діапазон — 1104. Докладний опис експерименту та апаратури див. в роботі Stair et al. (1985). Деякі результати експерименту подано в табл. 4.

Таблиця 2. Результати експерименту SPIRIT 1

Тангенційні висоти, км	Умови спостереження	Хвильове число, см^{-1}	Речовина	Шумовий еквівалент спектральної інтенсивності, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	Спектральна інтенсивність, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$
141	ніч, аврора	667	$\text{CO}_2(\nu_2)$	$7 \cdot 10^{-13}$	10^{-10}
141	ніч, аврора	1876	$\text{NO}(1-0)$	$5 \cdot 10^{-12}$	10^{-10}
82	ніч, аврора	667	$\text{CO}_2(\nu_2)$	$7 \cdot 10^{-13}$	$7 \cdot 10^{-8}$
96	ніч, аврора	667	$\text{CO}_2(\nu_2)$	$7 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-8}$
109	ніч, аврора	667	$\text{CO}_2(\nu_2)$	$7 \cdot 10^{-13}$	$8 \cdot 10^{-9}$
124	ніч, аврора	667	$\text{CO}_2(\nu_2)$	$7 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-9}$
140	ніч, аврора	667	$\text{CO}_2(\nu_2)$	$7 \cdot 10^{-13}$	$1.5 \cdot 10^{-10}$

Таблиця 3. Результати експерименту CIRRI 1A

Тангенційні висоти, км	Умови спостереження	Хвильове число, см^{-1}	Речовина	Шумовий еквівалент спектральної інтенсивності, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	Спектральна інтенсивність, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$
86	ніч	770—1250	$\text{OH}(N \rightarrow N-1)$, оберт.	$3.7 \cdot 10^{-14}$ на 700 см^{-1}	$2 \cdot 10^{-10}$
86	ніч	450—570	$\text{OH}(N \rightarrow N-1)$, оберт.	$3.7 \cdot 10^{-14}$ на 700 см^{-1}	10^{-10}
86	ніч	1042	$\text{O}_3(\nu_3)$	$3.7 \cdot 10^{-14}$ на 700 см^{-1}	$3 \cdot 10^{-8}$
86	ніч	2750—3750	$\text{OH}(\nu \rightarrow \nu-1)$, колив.-оберт.	$3.7 \cdot 10^{-14}$ на 700 см^{-1}	$(1-8) \cdot 10^{-9}$
146	день, $Z_C = 47^\circ$	1650—2050 (1876)	NO , основ. смуга	$3.7 \cdot 10^{-14}$ на 700 см^{-1}	$3 \cdot 10^{-9}$
150	ніч, спокійні умови, $Z_C = 154^\circ$	1650—2050 (1876)	NO , основ. смуга	$3.7 \cdot 10^{-14}$ на 700 см^{-1}	$7 \cdot 10^{-9}$
170	день, $Z_C = 42^\circ$	1730—2000	R-вітка колив. $\text{NO}(X^2\Pi)$	$3.7 \cdot 10^{-14}$ на 700 см^{-1}	$1.5 \cdot 10^{-10}$
196	ніч, аврора, $Z_C = 135^\circ$	1650—2050 (1876)	NO , основ. смуга	$3.7 \cdot 10^{-14}$ на 700 см^{-1}	$8 \cdot 10^{-10}$
196	ніч, аврора, $Z_C = 135^\circ$	1810—2050	R-вітка колив. $\text{NO}(X^2\Pi)$	$3.7 \cdot 10^{-14}$ на 700 см^{-1}	$1 \cdot 10^{-10}$
85	ніч	2143	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$	$3.7 \cdot 10^{-14}$ на 700 см^{-1}	$7 \cdot 10^{-11}$
85	ніч	2096	$^{13}\text{C}^{16}\text{O}$	$3.7 \cdot 10^{-14}$ на 700 см^{-1}	$5 \cdot 10^{-11}$
85	ніч	2092	$^{12}\text{C}^{18}\text{O}$	$3.7 \cdot 10^{-14}$ на 700 см^{-1}	$2 \cdot 10^{-11}$

Таблиця 4. Результати експерименту HIRIS

Тангенційні висоти, км	Умови спостереження	Хвильове число, см^{-1} (довжина хвилі, мкм)	Речовина	Шумовий еквівалент спектральної інтенсивності, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	Спектральна інтенсивність, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$
98	ніч, аврора	667(15)	$\text{CO}_2(\nu_2)$	$5 \cdot 10^{-12}$ на 1000 см^{-1}	$4.2 \cdot 10^{-8}$
98	ніч, аврора	1042(9.6)	$\text{O}_3(\nu_3)$	$5 \cdot 10^{-12}$ на 1000 см^{-1}	$8.5 \cdot 10^{-10}$
98	ніч, аврора	1876(5.3)	$\text{NO}(\Delta v = 1)$	$5 \cdot 10^{-12}$ на 1000 см^{-1}	$2.5 \cdot 10^{-10}$
98	ніч, аврора	2300(4.3)	$\text{CO}_2(\nu_3)$	$5 \cdot 10^{-12}$ на 1000 см^{-1}	$5.0 \cdot 10^{-10}$

- Бейзер А. Основные представления современной физики. — М.: Атомиздат, 1973.—485 с.
- Коцаренко М. Я., Корепанов В. С., Івченко В. М. Дослідження іоносферних провідників землетрусів (експеримент «Попередження») // Космічна наука і технологія.—1995.—№ 1.—С. 96—99.
- Липеровский В. И., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. Ионосферные предвестники землетрясений. — М.: Наука, 1992.—305 с.
- Мишин Е. В., Ружин Ю. Я., Телегин В. А. Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой. — Л.: Гидрометеиздат, 1989.—264 с.
- Мороженко О. В., Сосонкін М. Г., Шаврина А. В., Іванов Ю. С. Проблеми дистанційного моніторингу глобальних змін газової складової земної атмосфери // Космічна наука і технологія.—1995.—1, № 2-6.—С. 3—17.
- Ружин Ю. Я., Ораевский В. Н., Депену А. Х. Сейсмоионосферные предвестники. — М., 1993.—47 с.—(Препринт РАН № 92 (1039)).
- Сочнев В. Г., Тулинов В. Ф. Исследование потока инфракрасного излучения верхней атмосферы на 28-м ИСЗ «Метеор» // Тр. ГосНИИПИР.—1980.—Вып. 11.—С. 52—62.
- Adler-Golden S. M., Matthew M. W., and Smith D. R. Upper atmospheric infrared radiance from CO₂ and NO: observed during the SPIRIT 1 rocket experiment // J. Geophys. Res.—1991.—96A, N 7.—P. 11319—11329.
- Adler-Golden S. M., Gruninger J., and Smith D. R. Derivation of atmospheric atomic oxygen and hydrogen profiles from ozone ν_3 band emission // J. Geophys. Res.—1992.—97A, N 12.—P. 19509—19518.
- Ahmadjian M., Nadile R. M., Wise J. O., Bartschi B. CIRRIS-1A space shuttle experiment // J. Spacecraft and Rockets.—1990.—27, N 6.—P. 669.
- Bartschi B., Steed A., Blakeley J., et al. Cryogenic infrared radiance instrumentation for shuttle (CIRRIS 1A): Instrumentation and flight performance // Pros. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.—1992.—N 1765.—P. 64—73.
- Caledonia G. E., Green B. D., and Nadile R. M. The analysis of SPIRE measurements of atmospheric limb CO₂ (ν_2) fluorescence // J. Geophys. Res.—1985.—90A, N 10.—P. 9783—9788.
- Dodd J. A., Winick J. R., Blumberg W. A., et al. CIRRIS-1A observation of $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ and $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ fundamental band radiance in the upper atmosphere // Geophys. Res. Lett.—1993.—20, N 23.—P. 2683—2686.
- Dodd J. A., Blumberg W. A., Lipson S. J., et al. OH (ν , N) column densities from high-resolution Earthlimb spectra // Geophys. Res. Lett.—1993.—20, N 4.—P. 305—308.
- Dodd J. A., Lipson S. J., Lowell J. R., et al. Analysis of hydroxyl Earthlimb airglow emissions: kinetic model for state-to-state dynamics of OH (ν , N) // J. Geophys. Res.—1994.—99D, N 2.—P. 3559—3585.
- Espy P. G., Harris C. R., Steed A. J., et al. Rocketborne interferometer measurements of infrared auroral spectra // Planet. Space. Sci.—1988.—36, N 6.—P. 543—551.
- Fishkova L. M., Gokberg M. B., Pilipenko V. A. Relationship between night airglow and seismic activity // Ann. Geophys.—1983.—3, N 6.—P. 689.
- James T. C., Kumer J. B. Fluorescence of CO₂ near 4.3 μm : Application to daytime limb radiance calculations // J. Geophys. Res.—1973.—78.—P. 8320—8329.
- Nebel H., Wintersteiner P. P., Picard R. H., et al. CO₂ non-local thermodynamic equilibrium radiative excitation and infrared thermoglow at 4.3 μm : application of Spectral Infrared Rocket Experiment data // J. Geophys. Res.—1994.—99D, N 5.—P. 10409—10419.
- Parrot M. Electromagnetic noise due to earthquakes // Handbook of Atmospheric Electrodynamics. — N.Y.: CRC Press, 1995.—P. 95—116.
- Rawlins W. T., Fraser M. E., Miller S. M. Rovibrational excitation of nitric oxide in the reaction of O₂ with metastable atomic nitrogen // J. Phys. Chem.—1989.—93.—P. 1097.
- Sharma R. D., Ratkowski A. J., Sandberg R. L., et al. Description of SHARS, the strategic high-altitude radiance code // Rep. GL-TR-89-0229, Geophys. Lab., Hanscom AFB, MA, 1989.
- Sharma R. D., Wintersteiner P. P. CO₂ component of daytime earth limb emission at 2.7 micrometers // J. Geophys. Res.—1985.—90A, N 10.—P. 9789—9803.
- Smith D. R. Evidence of off-axis leakage radiance in high-altitude IR rocketborne measurements // Pros. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.—1988.—30.—P. 967—974.
- Smith D. R., Ahmadjian M. Observation of nitric oxide rovibrational band head emissions in the quiescent airglow during the CIRRIS-1A Space Shuttle // Geophys. Res. Lett.—1993.—20, N 23.—P. 2679—2682.
- Smith D. R., Blumberg W. A., Nadile R. M., et al. Observations of high-N hydroxyl pure rotation lines in atmospheric emission spectra by the CIRRIS-1A Space Shuttle experiment // Geophys. Res. Lett.—1992.—19, N 6.—P. 593—596.
- Stair A. T., Pritchard J., Coleman I. et al. Rocketborne cryogenic (10 K) high-resolution interferometer spectrometer flight HIRIS: auroral and atmospheric IR emission spectra // Appl. Optics.—1983.—22, N 7.—P. 1056—1069.
- Stair A. T., Sharma R. D., Nadile R. M., et al. Observation of limb radiance with cryogenic spectral infrared rocket experiment // J. Geophys. Res.—1985.—90A, N 10.—P. 9763—9775.
- Winick J. R., Picard R. H., Makhlof U. Analysis of the 4.3 μm limb emission observed from STS-39 (abstract) // EOS Trans. AGU.—1992.—73.—43:418.
- Winick J. R., Picard R. H., and Wintersteiner P. P. On determining the carbon budget (CO₂ and CO) of the lower thermosphere from non-equilibrium infrared radiance // Digest of Topical Meeting on Optical Remote Sensing of the Atmosphere.—1993.—5.—P. 361.
- Wintersteiner P. P., Picard R. H., Sharma R. D., et al. Line-by-line radiative excitation model for the non-equilibrium atmosphere: Application to CO₂ 15- μm emission // J. Geophys. Res.—1992.—97D, N 16.—P. 18083—18117.

INFRARED MOLECULAR EMISSION IN LIMB SOUNDING INVESTIGATION OF THE UPPER EARTH ATMOSPHERE: A REVIEW

A. K. Fedorenko and V. M. Ivchenko

Results obtained during a number of space experiments on the Earth limb observations in IR have been analyzed and summarized. For the primary molecular emission bands the changes of intensity due to variations in ionosphere conditions (night-time or sun-lighting conditions, auroral activity) and for different heights are discussed. An urgent demand for studying the results of infrared emission spectrum of the ionosphere has arisen during the project «Warning» preparation. The aim of the project is a careful study of ionospheric disturbances due to seismic activity including investigation of ionospheric emissions in the optical and infrared range.