

УДК 551.520.32

**Молекулярна емісія NO $\lambda = 5.3$ мкм
у верхній атмосфері Землі
як можливий провісник землетрусів**

А. К. Федоренко, В. М. Івченко

Київський університет імені Тараса Шевченка

Надійшла до редакції 25.06.97

В статті обґрунтовується перспективність використання емісійної смуги NO $\lambda = 5.3$ мкм як індикатора збурення іоносфери напередодні землетрусів. Енергія електричних полів і заряджених частинок, що висипаються, може ефективно трансформуватись в енергію ІЧ-випромінювання верхньої атмосфери через збудження коливань N₂ розігрітими в полях електронами з наступною передачею коливальної енергії до NO. Під час збурень іоносфери, які супроводжуються розігрівом нейтралів, молекула NO відіграє роль стабілізатора температури в атмосфері. Тобто, основна емісійна смуга NO чутливо реагує на прояви різноманітних збурень в іоносфері.

Одним із завдань проекту «Попередження» [21] є пошук можливих проявів сейсмічної активності в ІЧ-діапазоні випромінювання верхньої атмосфери Землі. ІЧ-діапазон (1—20 мкм) до цього часу не використовувався для пошуку попередників землетрусів, проте є підстави сподіватись, що окремі молекулярні смуги в цьому діапазоні можуть виявитись чутливими індикаторами збурень іоносфери. В зв'язку з цим було узагальнено результати ряду космічних експериментів по дослідженню ІЧ-емісій верхньої атмосфери [27]. Серед ряду емісійних молекулярних смуг (CO₂(ν_2) $\lambda = 15$ мкм, O₃(ν_3) $\lambda = 9.6$ мкм, NO(1-0) $\lambda = 5.3$ мкм, CO₂(ν_3) $\lambda = 4.3$ мкм та ін.), які спостерігались в ході експериментів [29, 30, 32, 39] особливу увагу привертає смуга NO $\lambda = 5.3$ мкм.

По-перше, смуга NO $\lambda = 5.3$ мкм є найбільш інтенсивною смугою емісії в ІЧ-діапазоні вище 120 км [40]. По-друге, молекула оксиду азоту є чутливим індикатором зміни умов в атмосфері. Зокрема, концентрація NO і особливо інтенсивність смуги NO $\lambda = 5.3$ мкм виявляються дуже чутливими

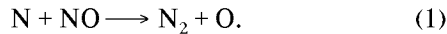
до варіацій електричного поля [14], потоків високоенергійних заряджених частинок [5], варіацій температури [13]. Зміни цих іоносферних параметрів (варіації електричного поля, збурення температури іоносферної плазми, поява та варіації потоків геоактивних частинок) належать до основних типів іоносферних збурень, які згідно із сучасними уявленнями передують землетрусам та їх супроводжують [22].

Таким чином, є підстави більш докладно розглянути поведінку емісійної смуги NO $\lambda = 5.3$ мкм.

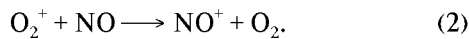
**УТВОРЕННЯ NO У ВЕРХНІЙ АТМОСФЕРІ
ТА МЕХАНІЗМИ ЗБУДЖЕННЯ ЕМІСІЇ NO $\lambda = 5.3$ мкм**

Основний вклад в ІЧ-випромінювання верхньої атмосфери Землі ($h > 120$ км) вносить молекула оксиду азоту (смуга з центром близько $\lambda = 5.3$ мкм). Класична фотохімічна схема утворення NO в атмосфері така [18]: спочатку в результаті іонізації та дисоціації молекул N₂ і рекомбінації

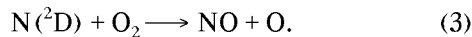
іонів NO^+ і N_2^+ утворюються атоми $\text{N}(^4\text{S})$ і $\text{N}(^2\text{D})$, які при активній взаємодії з молекулами O_2 утворюють NO . В нижній частині термосфери ($h < 130$ км), де концентрація молекул O_2 велика ($\sim 10^9 \text{ см}^{-3}$ на 130 км), атомарний азот швидко перетворюється в NO . На більших висотах концентрація NO зменшується, а атомів N — навпаки — збільшується. Прискорює падіння концентрації оксиду азоту з висотою реакція взаємного «знищення» N і NO [5]:



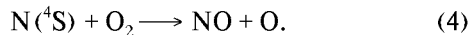
Реакція (1) є основним механізмом, який обумовлює зменшення концентрації NO на висотах $h > 100$ км. Лише в області $h \approx 90$ км важливу роль відіграють фотодисоціація і фотоіонізація NO (вдень), а також процес



В роботі [14] розраховано висотні профілі концентрації NO для різних атмосферних умов. Домінуючим механізмом утворення NO на всіх висотах є реакція



Вважалось, що лише на висотах $h > 180$ км помітний вклад в утворення NO починає давати процес:



Проте останнім часом в зв'язку з результатами експерименту CIRRIS 1A [30] переглядається роль реакції (4). В експерименті CIRRIS 1A було зафіксовано оберталине збудження молекул NO високого ступеня, яке неможливо пояснити лише за допомогою процесу (3). З іншого боку, саме в реакції (4) продукується NO з високим ступенем як коливального, так і обертального збудження. Тому можливо, що вклад процесу (4) в утворення NO недооцінюється. Розрахунки показують [36], що в умовах мінімуму сонячної активності для екваторіальних широт цей додатковий механізм може давати від 6 до 30 % продукції NO в нижній термосфері.

Основна емісійна смуга молекули NO — це смуга з центром на $\lambda = 5.3$ мкм. Виникає вона внаслідок коливально-обертальних переходів у молекулі NO . Інтенсивність смуги визначається швидкістю збудження та дезактивації коливально-обертальних рівнів. Тому інтенсивність смуги NO ($\lambda = 5.3$ мкм) залежить не тільки від концентрації молекул оксиду азоту в основному стані, а й від концентрацій різних складових, що впливають на швидкості збудження і дезактивації першого коливального рівня.

Теоретичні розрахунки для інтенсивності смуги $\lambda = 5.3$ мкм представлено в роботі [14]. Проаналізовано також основні механізми збудження NO на різних висотах. На нижчих висотах ($h = 90\text{—}100$ км) основним механізмом збудження NO є оптична накачка резонансним ІЧ-випромінюванням від нижчих шарів атмосфери і від Сонця. В області $h = 100\text{—}120$ км основним механізмом збудження NO є хімічна реакція (3). На висотах $h > 120$ км домінуючим стає теплове збудження в зіткненнях $\text{NO} - \text{O}$. Таким є основний вклад в коливальне збудження NO різних процесів на вказаних висотних інтервалах. Дезактивація ж коливального збудження молекул NO на висотах $h = 90\text{—}110$ км обумовлена зіткненнями з атомами кисню, а при $h = 120$ км — спонтанним радіаційним розпадом.

МОЛЕКУЛА NO І СОНЯЧНА АКТИВНІСТЬ

Вимірювання на супутнику Solar Mesosphere Explorer (SME) [34] показали, що концентрація NO на низьких широтах на висоті $h = 110$ км зменшилась приблизно від $3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ до $4 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ за період з січня 1982 р. по квітень 1985 р. Цьому проміжку часу відповідає низхідна фаза сонячного циклу, на протязі якого середньомісячна відносна кількість сонячних плям зменшилась приблизно від 150 до 25.

Крім цього, на SME було зареєстровано зміну концентрації NO у два рази на протязі 27-денного періоду обертання Сонця (для високої сонячної активності). Як уже згадувалось, основне джерело утворення NO у нижній термосфері — це реакція $\text{N}(^2\text{D})$ атомів з молекулами кисню (реакція (3)). Атоми $\text{N}(^2\text{D})$ утворюються в результаті ряду реакцій іон-нейтрал і прямої дисоціації молекул N_2 фотонами і фотоелектронами. Виникнення піку концентрації NO на висоті близько 115 км є наслідком іонізації і дисоціації молекул N_2 фотоелектронами, які продукуються сонячним випромінюванням з $\lambda < 30$ нм (жорсткий ультрафіолет). Розрахунки показують [34], що варіації $[\text{NO}]$ на протязі циклу сонячної активності (на низьких широтах в нижній термосфері) можуть бути обумовлені змінами потоку сонячного випромінювання з $\lambda < 30.0$ нм. Варіації концентрації NO на протязі періоду обертання Сонця добре корелюють із змінами потоку м'якого рентгенівського випромінювання в діапазоні $\lambda = 1.8\text{—}5.0$ нм [31, 34, 37]. Зміна потоку від Сонця в діапазоні 1.8—5.0 нм в три рази на протязі одного оберту призводить до зміни концентрації NO в області піку приблизно в два рази, що

узгоджується із спостереженнями на супутнику.

Як уже згадувалось вище, основне джерело продукції NO в E-області іоносфери — це реакція $N(^2D)$ з O_2 (3). Процес (4) на цих висотах є другорядним. Значення коефіцієнта швидкості реакції $N(^4S) + O_2$ складає

$$k = 1.5 \cdot 10^{-11} \exp(-3600/T) \text{ см}^3/\text{с}$$

[38]. Завдяки температурній залежності k при значному збільшенні температури механізм (4) утворення NO може стати домінуючим. Так, у верхній термосфері при переході від сонячного мінімуму до максимуму температура збільшується приблизно від 800 до 1130 K на висоті 200 км згідно з моделлю MSIS-86 [35]. Згідно з розрахунками [38] в E-шарі іоносфери, де значення k мале, концентрація NO визначається атомами $N(^2D)$. На більших висотах k збільшується з підвищенням температури, і вклад $N(^4S)$ в продукцію NO зростає. Однак, для умов мінімуму сонячної активності $N(^2D) + O_2$ залишається основним джерелом NO і на більших висотах. В період максимуму активності механізм (4) починає переважати вже при $h = 130$ км. Така різниця обумовлена відмінністю висотних профілів температури термосфери для умов мінімуму і максимуму сонячної активності. На висоті $h = 200$ км $N(^4S) + O_2$ механізм дає близько 80 % загальної продукції NO в максимумі активності [38] і близько 40 % при середній активності Сонця [14].

Інтенсивність же ІЧ-випромінювання в смузі $\lambda = 5.3$ мкм збільшується не тільки за рахунок збільшення концентрації NO, а і за рахунок збільшення швидкості теплової накачки рівня $V = 1$ в зіткненнях NO — O (при переході від мінімуму до максимуму сонячної активності). Таким чином, залежність інтенсивності смуги $\lambda = 5.3$ мкм від сонячної активності повинна бути більш різкою, ніж залежність концентрації NO.

ВАРІАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРИ АТМОСФЕРИ В ПЕРІОД ПІДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРУСУ ТА ПОВ'ЯЗАНІ З ЦИМ МОЖЛИВІ ЗМІНИ ІНТЕНСИВНОСТІ ЕМІСІЇ NO $\lambda = 5.3$ мкм

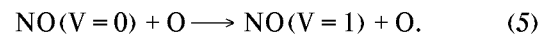
В спостереженнях емісії атомарного кисню $\lambda = 630$ нм за декілька десятків хвилин перед початком Іранського землетрусу (20—21 червня 1990 р., $M = 7.5$) було зареєстровано підвищення температури F_2 -шару іоносфери на 350 K [1]. В Абастумані за спостереженнями цієї ж емісії [O I] $\lambda = 630$ нм перед Румунським землетрусом (31 серпня 1986 року, $M = 6.7$) зафіксовано збільшення температури атмосфери приблизно на 200 K (дані приведено

до висоти 300 км) [26].

Таким чином, експериментально зареєстровано явище розігрівання верхньої атмосфери в період підготовки сильних землетрусів. Механізм підвищення температури незрозумілий. Привертає увагу гіпотеза розігрівання F_2 -області іоносфери за допомогою акусто-гравітаційних хвиль [2, 23].

В роботі [23] розглядається наступний механізм підвищення температури. За декілька діб до початку землетрусу відбувається інтенсифікація нестационарного виходу літосферних газів в атмосферу [6]. Це може призвести до генерації атмосферних гравітаційних хвиль з характерними періодами 1—2 год і горизонтальними розмірами порядку декількох сотень кілометрів. Поширюючись на висоті іоносфери, ці хвилі створюють початкові збурення плазми, достатні для розвитку плазмової нестійкості Релея-Тейлора. В результаті останньої формуються так звані плазмові кулі (області зниженої концентрації плазми). В плазмових кулях виникає значне поляризаційне електричне поле, поперечне до магнітного, яке ефективно нагріває іони, а останні в результаті зіткнень нагрівають нейтральний компонент атмосфери.

Проаналізуємо, як зростання температури атмосфери може вплинути на інтенсивність емісії NO $\lambda = 5.3$ мкм. Для смуги емісії $\lambda = 5.3$ мкм на висотах $h > 120$ км домінуючим механізмом збудження є теплове збудження в зіткненнях NO — O:



Для константи швидкості теплового збудження в процесі (5) дається значення

$$\alpha = 3.6 \cdot 10^{-11} \exp(-2700/T)$$

[14]. Тому з підвищенням температури α збільшується за рахунок експоненційного множника. Гордиец, Марков [13] приводять результати розрахунків інтенсивності ІЧ-випромінювання в смузі $\lambda = 5.3$ мкм для різних значень температури екзосфери.

При зміні температури екзосфери, наприклад від 1000 до 1350 K, інтенсивність випромінювання в смузі NO $\lambda = 5.3$ мкм збільшиться приблизно від $6 \cdot 10^3$ ерг·см⁻²с⁻¹ до $1.1 \cdot 10^4$ ерг·см⁻²с⁻¹ (розглядаються вертикальні потоки енергії в смузі вище 90 км).

Таким чином, експериментально зареєстроване підвищення температури в F_2 -шарі іоносфери на 350 K призведе до відчутного збільшення інтенсивності смуги емісії NO $\lambda = 5.3$ мкм. Слід наголосити, що розрахунки в [13] проводились для вертикальних потоків енергії. Спектральні ж вимірювання в ході експерименту «Попередження» передбачається

проводити методом сканування лімбу атмосфери. Потіки по дотичних напрямках перевищуватимуть вертикальні потоки енергії на порядок і більше за рахунок геометрії лімбових спостережень.

**ІЧ-АНОМАЛІЇ ПОТОКУ
ВИСХІДНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗЕМЛІ
ТА ЇХНІЙ МОЖЛИВИЙ ВПЛИВ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ
СМУГИ ЕМІСІЇ NO $\lambda = 5.3$ мкм В Е-ОБЛАСТІ ІОНОСФЕРИ**

Аналіз теплових космічних знімків поверхні Землі в діапазоні випромінювання 10.5—11.3 мкм дав можливість зареєструвати так звані додатні теплові аномалії потоку в деяких сейсмоактивних регіонах Середньої Азії [15]. Під додатними тепловими аномаліями розуміють стійкі в часі області, від яких потік ІЧ-випромінювання від ділянки Землі більший в порівнянні з сусідніми областями. Інтенсивність висхідного ІЧ-випромінювання і його розподіл у часі і в просторі визначаються в першу чергу температурою поверхні Землі. Температура поверхні залежить від нагрівання Сонцем, метеорологічних умов, процесів в земній корі. Саме процеси, що протікають в земній корі, важливі з точки зору пошуку ефектів, що передують землетрусам та їх супроводжують. Зручним районом для дослідження зв'язку ІЧ-випромінювання від Землі з сейсмічною активністю є Середньоазіатський регіон, де стабільні метеорологічні умови (велика кількість безхмарних днів та низька вологість) і відносно висока сейсмічна активність. Щоб звести до мінімуму вплив сонячного нагріву на формування потоку висхідного ІЧ-випромінювання Землі, зйомки проводились перед світанком [25].

За декілька днів до початку Газлійського землетрусу 19 березня 1984 р. була зареєстрована додатня аномалія висхідного ІЧ-випромінювання на перетині Тамди-Токрауського і Таласо-Ферганського розломів (площа порядку 100 тис. км²). Слабкіші землетруси в цій же зоні теж попереджались появою додатньої аномалії. Аналогічні позитивні аномалії висхідного ІЧ-випромінювання спостерігались в іншому сейсмоактивному регіоні — Східному Середземномор'ї (в прибережній зоні до 300 км довжиною на границі Лівії та Єгипту). Основні загальні характеристики аномалій: велика площа (тисячі км² і більше), інтенсивність порядку декількох градусів, висока швидкість формування. Згідно з однією гіпотезою [15] поява цих аномалій пов'язана із зміною складу і концентрації газових домішок в приземних шарах атмосфери над активними розломами. Відомо, що через розломи кори в сейсмоактивних регіонах відбувається вихід на по-

верхню таких газів, як Н₂, СО, СО₂, СН₄, Rn та ін. [6]. Зміна складу приземної атмосфери може обумовити парниковий ефект [20].

Наприклад, збільшення на порядок концентрації СО₂ в приземному шарі атмосфери висотою 2 км призведе до підвищення температури поверхні Землі на декілька градусів [15], що узгоджується з інтенсивністю спостережуваних аномалій.

В області висот 90—100 км основним механізмом збудження емісії NO $\lambda = 5.3$ мкм є оптична накачка резонансним ІЧ-випромінюванням від нижчих шарів атмосфери і від Сонця. Ймовірність накачки випромінюванням, що надходить з нижньої атмосфери, досить різко залежить від ефективної температури цього випромінювання. В роботі [14] ця ймовірність задається формулою

$$W_{10}^3 = 0.5A_{10} / [\exp(E_{10}/kT_3) - 1],$$

де E_{10} — енергія переходу, A_{10} — ймовірність спонтанного радіаційного розпаду, T_3 — ефективна температура нижньої атмосфери Землі для випромінювання з розглядуваною довжиною хвилі, k — стала Больцмана, 0.5 — фактор дилуції. Як видно з формули, залежність від ефективної температури випромінювання досить різка. При зміні T_3 всього на декілька градусів (наприклад від 240 до 243 К) ймовірність збудження зростає приблизно на 25 %. Якщо в період підготовки землетрусу температура поверхні Землі зростає на декілька градусів, ймовірність збудження рівня $V = 1$ молекули NO і відповідно інтенсивність емісії $\lambda = 5.3$ мкм збільшаться. Над областю підготовки землетрусу утворюються локальні зони з підвищеною інтенсивністю емісії $\lambda = 5.3$ мкм.

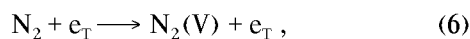
МОЛЕКУЛА NO В ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛЯХ

Природа механізму формування сейсмоіоносферних провісників землетрусів на сьогоднішній день ще недостатньо вивчена. Проте багато вчених віддають перевагу електромагнітній природі цих явищ (виникнення аномальних електричних полів в іоносфері перед землетрусами). Згідно з однією з гіпотез [17] джерелом електричних полів на поверхні Землі перед землетрусами можуть бути великомасштабні струмові системи. Напруженість електричного поля від таких струмових систем може досягати на поверхні Землі 10³—10⁴ В/м в частотному діапазоні 1—10³ Гц. Ці поля можуть проникати на висоти іоносфери, послаблюючись при цьому на 5–6 порядків величини. Тобто, поля в нижній іоносфері можуть складати 10—100 мВ/м [16]. Значне послаблення поля при проникненні

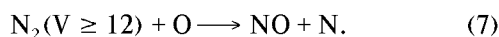
його на висоті іоносфери, є найбільш вразливим місцем електромагнітної гіпотези механізму формування провісників землетрусів. Задача про проникнення в іоносферу вертикального електростатичного поля, локалізованого в області епіцентру майбутнього землетрусу на поверхні Землі розглядається в роботі [19]. Отримано, що ефективність проникнення поля вночі значно вища, ніж вдень. Напруженість електростатичного поля на іоносферних висотах має помітне значення 0.3—0.7 мВ/м лише для великомасштабних сейсмічних джерел (характерний розмір області локалізації поля 100 км і більше), якщо величина поля в області епіцентру на поверхні Землі становить 1000 В/м.

Існування аномальних електричних полів в іоносфері над областю підготовки землетрусу було підтверджено експериментально. Результати експерименту по вивченню квазісталіх електричних полів над районами землетрусів, проведеного з борту ШСЗ «Интеркосмос–Болгария 1300», представлено в роботі [28]. Дані отримано 21.01.82 на орбіті, яка проходила над районом землетрусу (координати епіцентру: $\varphi = 3.39$ S, $\lambda = 177.43$ E, глибина $d = 33$ км, час початку землетрусу $t = 17^h 50^m 26.2^s$ UT). На розглядуваному відрізку орбіти горизонтальні компоненти електричного поля не перевищували 1 мВ/м (роздільна здатність приладу). В двох зонах: в $17^h 38^m$ над епіцентром землетрусу (в проекції по магнітних силових лініях з нижньої іоносфери на висоту ШСЗ) і в магнітоспряженій точці (в $17^h 35^m 15^s$) були зафіксовані величини поля 3—7 мВ/м. Розміри зон 1—1.5° по широті. Слід вказати, що над епіцентром і в магнітоспряженій точці спостерігались електричні поля, протилежні за знаком. Тобто, приблизно за 15 хв до головного поштовху в іоносфері над областю підготовки землетрусу збуджувались квазісталі електричні поля.

В роботі [14] розглядається механізм перетворення енергії електричних полів в енергію утворення NO і N. Суть механізму в тому, що в електричних полях відбувається розігрів теплових електронів, які коливаються збуджують молекулу N₂:



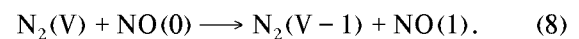
потім відбувається дисипація коливальної енергії N₂ в реакції:



Розрахунки показують [14], що реакція (7) стає ефективною при наявності електричних полів, де електрони розігріваються до $T_e \sim 4000$ К. На висоті $h = 110$ км така температура досягається при $E_1 \approx 3 \cdot 10^{-3}$ В/м (електричне поле паралельне до геомагнітного поля). Із збільшенням висоти величина

електричного поля, необхідного для розігріву електронів, зменшується і при $h = 160$ км становить $3 \cdot 10^{-4}$ В/м. Теоретично величини електричних полів сейсмічного походження можуть досягати значень, необхідних для запуску реакції (7). Тобто, механізм, який розглядався в [14] для пояснення аномально високих концентрацій NO на авроральних широтах, можна застосувати при розгляді сейсмоіоносферних ефектів для середніх широт.

Таким чином, в присутності досить сильних E_1 інтенсивність ІЧ-випромінювання в смузї NO $\lambda = 5.3$ мкм може різко збільшитись за рахунок збільшення концентрації NO в реакції (7). Крім цього, в сильних електричних полях E_1 через ріст [NO] і T_{N_2} важливим механізмом збудження емісії $\lambda = 5.3$ мкм (окрім реакції $N(^2D) + O_2$ і теплових зіткнень NO — O) може стати збудження в реакції міжмолекулярного коливального обміну [11]:



У випадку полів E_1 (перпендикулярних до геомагнітного) додаткове збудження NO може відбуватись за рахунок розігрівання іонів, які коливаються збуджують N₂ в зіткненнях. Однак виявляється, що навіть у випадку ефективного збудження N₂ нагріті іони не можуть забезпечити режим, коли процес (7) стає відчутним для утворення NO [14]. Проте розігріті іони в результаті зіткнень ефективно підвищують температуру нейтралів, що призведе до збільшення швидкості теплової накачки в зіткненнях NO — O і, відповідно, інтенсивності емісії $\lambda = 5.3$ мкм. Таким чином, енергія електричних полів може з високою ефективністю трансформуватись в енергію ІЧ-випромінювання NO. Підсилення інтенсивності емісії NO $\lambda = 5.3$ мкм особливо відчутне в полях, паралельних до геомагнітного. Якщо перед землетрусами в іоносфері виникають аномальні електричні поля порядку декількох мВ/м, ці поля повинні спричинити відчутне підсилення інтенсивності емісії $\lambda = 5.3$ мкм.

ТРАНСФОРМАЦІЯ ЕНЕРГІЇ ГЕОАКТИВНИХ ЧАСТИНОК В ЕНЕРГІЮ ІЧ-ВИПРОМІНЮВАННЯ В СМУЗІ $\lambda = 5.3$ мкм В ПЕРІОД ПІДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРУСУ

Останнім часом в ряді робіт розглядається кореляція потоків геоактивних частинок з сейсмічною активністю [3, 8, 9]. Вперше на можливий зв'язок потоків високоенергійних заряджених частинок в радіаційному поясі Землі з сейсмічністю було вказано в роботі [7], де проаналізовано результати експерименту «Марія» на орбітальній станції «Са-

лют-7» в 1985 р. В ході експерименту було зареєстровано три різких збільшення швидкості лічби (до 100 разів) заряджених частинок в області Бразильської магнітної аномалії, які неможливо було пояснити ні магнітними збуреннями, ні впливом сонячних спалахів. Аналіз збільшень потоку частинок показав, що особливість в розподілі високоенергійних електронів і протонів реєструвалась за 2.5—3 год до початку активної фази землетрусів в цьому регіоні [3]. Для детального вивчення ефекту проведено статистично-кореляційний аналіз варіацій потоків захоплених частинок з сейсмічною активністю за період з 16 червня по 16 липня 1990 р. [10, 24]. Встановлено, що дійсно існує просторово-часова кореляція сильних літосферних землетрусів і варіацій потоку частинок внутрішнього радіаційного поясу. Запропоновано наступний механізм зв'язку флуктуацій заряджених частинок з сейсмічною активністю. Основну частку серед захоплених частинок внутрішнього радіаційного поясу складають протони з енергіями порядку 30 MeV і більше [3]. Захоплені геомагнітним полем, протони таких енергій можуть резонансно взаємодіяти з УНЧ-випромінюванням, бо частоти коливань цих частинок між дзеркальними точками знаходяться в межах 1—10 Гц. Така взаємодія може призводити до висипання частинок з радіаційного поясу Землі. Значне зростання інтенсивності УНЧ та КНЧ-випромінювання перед землетрусами реєструвалось як на поверхні Землі поблизу епіцентра [33], так і в іоносфері над областю підготовки землетрусу [4].

Енергійні частинки (протони, електрони) можуть вносити значний вклад у формування складу атмосфери і енергетики ІЧ-випромінювання. В роботі [12] проведено теоретичний аналіз механізму трансформації енергії частинок, які висипаються, в енергію ІЧ-випромінювання. Енергія частинок затрачається в основному на іонізацію основних нейтральних складових атмосфери O , O_2 , N_2 , а також дисоціацію молекул. В результаті дисоціативної рекомбінації утворюються атоми $N(^4S)$ і $N(^2D)$, які при активній взаємодії з молекулами кисню продукують NO. Основним механізмом збудження коливань NO є реакція $N(^2D) + O_2$ (3). Приблизно 2.3 % енергії електронів, що висипаються, безпосередньо трансформуються в ІЧ-випромінювання в смугі NO $\lambda = 5.3$ мкм в результаті хімічної реакції (3). На нагрів газу і теплових електронів іде близько 60 % від повної енергії частинок. Ця енергія за рахунок теплового збудження коливань, переходить в енергію ІЧ-випромінювання в таких основних смугах: NO $\lambda = 5.3$ мкм (коливальне збудження в зіткненнях NO — O вище 120 км),

CO₂ $\lambda = 15$ мкм (коливальне збудження в зіткненнях CO₂ — O при $h < 120$ км) [12]. Інший механізм утворення NO в результаті взаємодії пучка електронів, що висипаються, не з нейтральною складовою, а з іоносферною плазмою, розглянули в роботі [5]. Показано, що при досить потужних висипаннях в іоносфері (потік енергії електронів $\sim 10^{-4}$ Дж/см²) на висотах 120—130 км може розвинути пучкова нестійкість, в результаті якої теплові електрони отримують енергію порядку декількох eV. Такі електрони ефективно збуджують коливальні ступені свободи N₂, а це може призвести до появи нового каналу утворення NO в реакції (7).

Таким чином, висипання заряджених частинок повинні супроводжуватись підсиленням інтенсивності емісії $\lambda = 5.3$ мкм як за рахунок нагріву газу, так і за рахунок збільшення концентрації NO.

ВИСНОВКИ

На основі розглянутого вище розділах можна зробити висновок, що емісія NO $\lambda = 5.3$ мкм є найважливішим каналом трансформації енергії електричних полів і захоплених енергійних частинок в енергію ІЧ-випромінювання атмосфери. При сильних збуреннях атмосфери, наприклад під час геомагнітних бурь, які супроводжуються розігрівом газу, теплопровідність відіграє другорядну роль у відтоку енергії, і він забезпечується в основному ІЧ-випромінюванням [12], тобто молекула NO відіграє роль стабілізатора температури середовища. Згідно із сучасними уявленнями, в іоносфері над областю підготовки землетрусу відбувається розігрів газу, виникають аномальні електричні поля, збільшуються потоки геоактивних частинок внутрішнього радіаційного поясу, тобто іоносфера є збуреною. Підходи і механізми, які розроблено для пояснення аномально високих концентрацій NO та інтенсивності емісії $\lambda = 5.3$ мкм під час геомагнітних бурь [13], можна до певної міри застосувати і при вивченні ефектів попередження землетрусів.

Узагальнивши вплив окремих відомих на сьогоднішній день ефектів попередження на інтенсивність смуги $\lambda = 5.3$ мкм, можна зробити висновок, що в атмосфері над зоною підготовки землетрусу повинні утворюватись локальні області з відчутно підвищеною інтенсивністю ІЧ-випромінювання молекули NO. Говорити конкретно про розміри цих областей досить важко. Можна лише зробити деякі припущення. Якщо прийняти електромагнітну гіпотезу взаємодії іоносфера—літосфера, то характерні розміри області з підвищеною інтенсивністю емісії $\lambda = 5.3$ мкм в E-області мають

бути того ж масштабу, що й лінійні розміри області підготовки землетрусу на поверхні Землі. Якщо ж віддати перевагу механізму передачі взаємодії за допомогою акусто-гравітаційних хвиль, то характерні розміри області будуть більш розмитими.

Таким чином, емісія NO $\lambda = 5.3$ мкм може виявитись чутливим індикатором збудження іоносфери напередодні землетрусів.

- Акмамедов Х. Интерферометрические измерения температуры в F-2 области ионосферы в период Иранского землетрясения 20.06.1990 г. // Геоматнетизм и аэрономия.—1993.—33, № 1.—С. 163—165.
- Акмамедов Х., Перцев Н. Н., Романова Н. Н. и др. Возможный механизм увеличения температуры F-2 области ионосферы в период Иранского землетрясения 20 июня 1990 года // Геоматнетизм и аэрономия.—1996.—36, № 2.—С. 119—123.
- Алешина М. Е., Воронов С. А., Гальпер А. Н., и др. О взаимосвязи положений очагов землетрясений и областей выпадания высокоэнергичных частиц из радиационного пояса // Космич. исследования.—1992.—30, вып. 1.—С. 79—83.
- Биличенко С. В., Ингин А. С., Ким Э. Ф. и др. УНЧ-отклик ионосферы на процессы подготовки землетрясений // Докл. АН СССР.—1990.—311, № 5.—С. 1077—1081.
- Власов М. Н., Мишин Е. В., Телегин В. А. О механизме образования высоких концентраций окиси азота в полярной ионосфере // Геоматнетизм и аэрономия.—1980.—20, № 1.—С. 57—61.
- Войтов Г. И., Добровольский И. П. Химические и изотопно-углеродные нестабильности потоков природных газов в сейсмически активных областях // Изв. АН СССР. Физ. Земли.—1994.—3.—С. 20.
- Воронов С. А., Гальпер А. М., Кириллов-Угрюмов В. Г. Регистрация возрастания потоков высокоэнергичных частиц в районе Бразильской магнитной аномалии 10 сентября 1985 года. — М.: МИФИ, 1988.—48 с.—(Препринт 006-88).
- Гальпер А. М., Дмитренко В. В., Никитина Н. В. и др. О возможности предсказания землетрясений по изменению потоков высокоэнергичных заряженных частиц в околоземном космическом пространстве. — М., 1988.—16 с.—(Препринт / МИФИ; № 069-88).
- Гальпер А. М., Дмитренко В. В., Никитина Н. В. и др. Взаимосвязь потоков высокоэнергичных заряженных частиц в радиационном поясе с сейсмичностью Земли // Космич. исследования.—1989.—27, № 5.—С. 789—792.
- Гинзбург А. Е., Малышев А. Б., Прошкина И. П., Пустоветов В. П. Корреляция землетрясений и вариаций потока высокоэнергичных частиц во внутреннем радиационном поясе // Геоматнетизм и аэрономия.—1994.—34, № 3.—С. 60—66.
- Гордиец Б. Ф. Колебательная релаксация ангармонических молекул N₂ и концентрация окиси азота в возмущенной термосфере // Геоматнетизм и аэрономия.—1977.—17, № 5.—С. 871—878.
- Гордиец Б. Ф., Марков М. Н. Инфракрасное излучение в энергетическом балансе верхней атмосферы // Космич. исследования.—1977.—15, вып. 5.—С. 725—735.
- Гордиец Б. Ф., Марков М. Н. ИК-излучение и концентрация NO в существенно разогретой верхней атмосфере // Геоматнетизм и аэрономия.—1983.—23, № 3.—С. 446—450.
- Гордиец Б. Ф., Марков М. Н., Шелепин Л. А. Теория инфракрасного излучения околоземного космического пространства // Тр. Физ. ин-та. АН СССР.—1978.—105.—С. 7—71.
- Горный В. И., Сальман А. Г., Тронин А. А., Шилин Б. В. Уходящее инфракрасное излучение Земли — индикатор сейсмической активности // Докл. АН СССР.—1988.—301, № 1.—С. 67—69.
- Гохберг М. Б., Гершезон Н. И., Гуфельд И. Л. и др. О возможных эффектах воздействия электрических полей сейсмического происхождения на ионосферу // Геоматнетизм и аэрономия.—1984.—24, № 2.—С. 217—222.
- Гохберг М. Б., Гуфельд И. Л. Источники электромагнитных предвестников землетрясений // Докл. АН СССР.—1980.—250, № 2.—С. 323.
- Данилов А. Д., Власов М. Н. Фотохимия ионизированных и возбужденных частиц в нижней ионосфере. — Л.: Гидрометеоздат, 1973.—200 с.
- Ким В. П., Хегай В. В., Иллич-Свитыч П. В. О возможном ионосферном предвестнике землетрясений // Изв. АН СССР. Физ. Земли.—1994.—3.—С. 37—40.
- Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И. Парниковый эффект атмосферы и климат. — Л.: Гидрометеоздат, 1984.—212 с.
- Коцаренко М. Я., Корепанов В. С., Івченко В. М. Дослідження іоносферних провідників землетрусів (експеримент «Попередження») // Косміч. наука і технологія.—1995.—1, № 1.—С. 96—99.
- Липеровский В. И., Похотелов О. А., Шалимов С. А. Ионосферные предвестники землетрясений. — М.: Наука, 1992.—305 с.
- Перцев Н. Н., Шалимов С. Л. Генерация атмосферных гравитационных волн в сейсмически активном регионе и их влияние на ионосферу // Геоматнетизм и аэрономия.—1996.—36, № 2.—С. 111—118.
- Пустоветов В. П., Малышев А. Б. Пространственно-временная корреляция землетрясений и вариаций потока высокоэнергичных частиц во внутреннем радиационном поясе // Космич. исследования.—1993.—31, вып. 5.—С. 84.
- Сальман А. Г., Тронин А. А. Космическая тепловая съемка — новый метод дистанционного изучения сейсмоактивных регионов // Сов. геология.—1989.—№ 10.—С. 90—93.
- Торошелидзе Т. И. О возмущениях в верхней атмосфере Земли, предшествующих землетрясениям // Сооб. АН ГрССР.—1987.—126, № 1.—С. 77—80.
- Федоренко А. К., Івченко В. М. Дослідження інфрачервоних молекулярних емісій від лімбу верхньої атмосфери Землі в рамках проекту «Попередження» (огляд) // Косміч. наука і технологія.—1996.—2, № 5—6.—С. 89—96.
- Чмырев В. М., Исаев Н. В., Биличенко С. В. и др. Электрические поля и гидромагнитные волны в ионосфере над очагом землетрясения // Геоматнетизм и аэрономия.—1986.—26, № 6.—С. 1020—1022.
- Adler-Golden S. M., Mattew M. W., 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.
- 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.
- Barth C. A., Tobiska D. E., Siskind D. E., Cleary D. D. Solar-terrestrial coupling: low-latitude thermospheric nitric oxide // Geophys. Res. Lett.—1988.—N 15.—P. 92—94.
- Caledonia G. E., Green B. D., Nadile R. M. The analysis of SPIRE measurements of atmospheric limb CO₂ (v₂) fluorescence // J. Geophys. Res.—1985.—90A, N 10.—P. 9783—9788.
- Fraser-Smith A. C., Bernard A., McGill P. R. Low-frequency

- magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieto earthquake // *Geophys. Res. Lett.*—1990.—17, N 9.—P. 1465—1468.
34. Fuller-Rowell T. J. Modeling the Solar cycle change in nitric oxide in the thermosphere and upper mesosphere // *J. Geophys. Res.*—1993.—98A, N 2.—P. 1559—1570.
35. Hedin A. E. MSIS-86 thermospheric model // *J. Geophys. Res.*—1987.—92.—P. 4649—4662.
36. Sharma R. D., Sun Y., Dalgarno A. Highly rotationally excited nitric oxide in the terrestrial thermosphere // *Geophys. Res. Lett.*—1993.—20, N 19.—P. 2043—2045.
37. Siskind D. E., Barth C. A., Cleary D. D. The possible effect of solar soft X rays on thermospheric nitric oxide // *J. Geophys. Res.*—1990.—95.—P. 4311—4317.
38. Siskind D. E., Rusch D. W. Nitric oxide in the middle to upper thermosphere // *J. Geophys. Res.*—1992.—97A, N 3.—P. 3209—3217.
39. Stair A. T., Pritchard J., Coleman J., et al. Rocketborne cryogenic (10K) high resolution interferometer spectrometer flight HIRIS: auroral and atmospheric IR emission spectra // *Appl. Optics.*—1983.—27, N 7.—P. 1056—1069.
40. Stair A. T., Sharma R. D., Nadile R. H., et al. Observation of limb radiance with cryogenic spectral infrared rocket experiment // *J. Geophys. Res.*—1985.—90A, N 10.—P. 9763—9775.

**MOLECULAR NO EMISSION AT $\lambda = 5.3 \mu\text{M}$
IN THE UPPER ATMOSPHERE
AS A POSSIBLE EARTHQUAKE PRECURSOR**

A. K. Fedorenko and V. N. Ivchenko

We discuss the possibility of using NO emission ($\lambda = 5.3 \mu\text{m}$) as a seismic activity indicator. The energy of electric fields and geoactive particles in the upper atmosphere can be effectively converted into the IR radiation energy through the vibrational excitation of the N_2 molecules with the subsequent transmission of the vibrational energy to NO. The nitric oxide molecule can play the role of a stabilizer of neutrals' temperature during ionospheric disturbances. So, the NO fundamental band emission is a sensitive indicator of various disturbances of the ionosphere.