

УДК 537.86; 621.37

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ДОСЛІДЖЕННЯ ГОРІШНИХ ШАРІВ АТМОСФЕРИ

В.В. Мищенко, О.М. Корольов, Д.Л. Чечоткін, Д.В. Шульга

Радіоастрономічний інститут НАН України

VMyshen@gmail.com

Фізика атмосфери є однією з найважливіших наук про Землю, яка сформувалась на початку ХХ сторіччя. Результати отриманих досліджень широко використовуються для практичних цілей, зокрема при розрахунках міцності та довговічності дорожнього покриття шосейних доріг та автомобільних трас. Відповідно до стандартної моделі атмосфери Землі вона представляється багатошаровою, причому існує сильний зв'язок та взаємний вплив різних шарів. Відзначимо, що різні шари атмосфери часто вивчаються різними методами.

Одним з найцікавіших шарів, який впливає як на вищі, так і на нижчі шари, є стратосфера, яка простягається від 12 до 70 км по висоті. Цей шар атмосфери почав активно досліджуватися після Другої світової війни, коли у розпорядженні вчених з'явилися нові технології, такі як ракетна техніка та компактні електронні прилади.

У Радянському Союзі такі дослідження розпочалися у 1949 році. Про це нещодавно було оприлюднено доповідь С П Королева на Всесоюзній конференції по ракетним дослідженням горішніх шарів атмосфери, яка проходила у Академії наук СРСР у квітні 1956 року [1].

Він відзначив, що дослідження стратосфери на висотах до 100 км дозволили отримати перші достовірні дані про цей шар атмосфери, та розпочались ще у 1948-49 роках. Вони проводились одночасно з розробкою та випробуванням потужних ракет, бо інакше ціна таких досліджень була би надвисокою. Контейнер з апаратурою розміщувався на ракеті та відстрілювався у найвищій точці підйому, і в подальшому, повільно спускався на парашуті. Нажаль, не всі запуски були вдалими, проте перші дослідження дозволили визначити хімічний склад атмосфери на великих висотах, одержати дані по напрямку вітрів у горішніх шарах атмосфери, визначити склад космічного та сонячного випромінювання та вирішити деякі інші фізичні задачі.

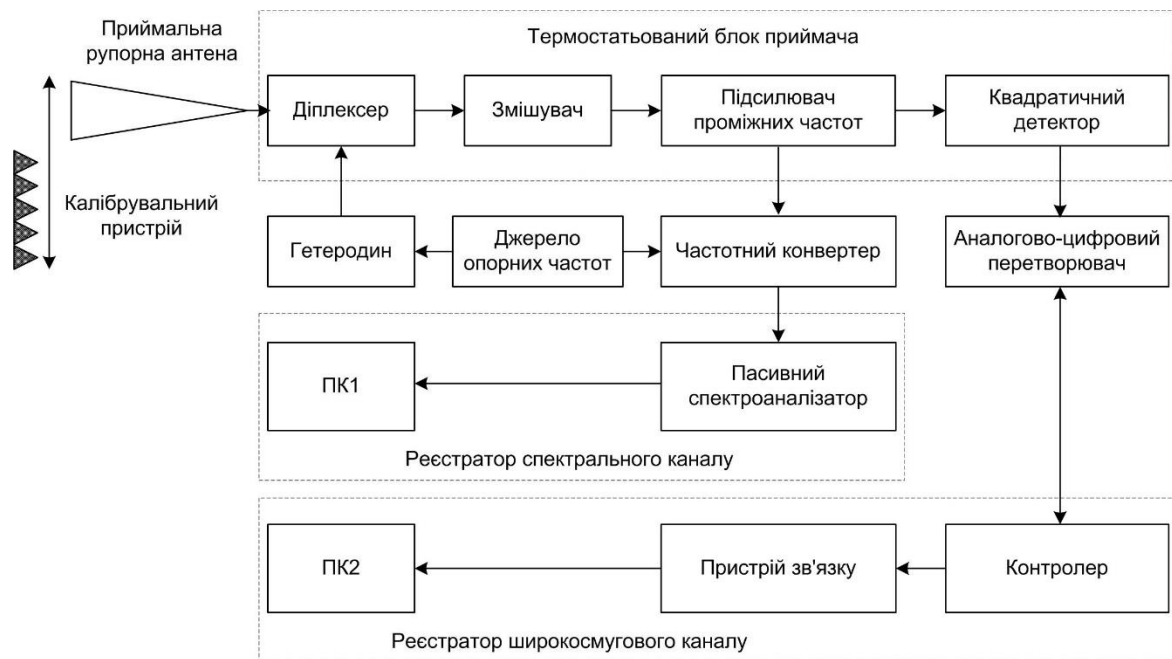
Другий етап дослідження горішніх шарів атмосфери розпочався у середині 60-х років, коли дослідницьку апаратуру почали розміщувати на штучних супутниках Землі. Завдяки цьому стало можливим одержувати інформацію майже з будь якої точки над земною поверхнею, але через постійний рух супутника неможливо здійснювати моніторинг стану атмосфери та збільшувати час накопичування при вимірюваннях. Однак всеосяжність супутникових досліджень – безальтернативна перевага, тому вони широко проводяться дотепер [2].

Дещо пізніше розвинулися нові методи дослідження стратосфери приборами наземного базування. Вони ґрунтуються на спостереженні та аналізі молекулярних спектрів випромінювання малих домішок атмосферних газів. Вивчаючи форму лінії випромінювання можна визначити тиск, рух та інші параметри оточення таких молекул. Для цих досліджень були розроблені спеціальні прибори – високочутливі спектрорадіометри надвисоких частот. Дослідження проводяться шляхом спостереження спектрів і можуть виконуватися у режимі моніторингу на частотах, де прозорість атмосфери достатньо висока, а молекулярні лінії випромінювання доволі інтенсивні. Найбільш придатними виявились молекули озону O_3 , монооксиду вуглецю CO та монооксиду хлору ClO . З'ясувалось, що кожна молекула найліпше підходить для різних діапазонів висот. Так для висот від 10 до 50 км це озон, а молекула CO більш інформативна від 30 до 80 км.

Зараз у світі існує біля десяти таких станцій, які розташовані у різних країнах, зокрема у Японії, Швейцарії, Німеччині, Китаю та інших [3, 4]. Одна з таких станцій спостереження атмосферного CO була розроблена та використовується для моніторингу впродовж декількох років в Радіоастрономічному інституті НАНУ [5]. Зараз ми розробляємо приймальну систему для спостереження стратосферного озону, проводимо випробування та тестові вимірювання [6].

Склад таких станцій спостереження доволі подібний, тому розглянемо його більш детально. Типова схема спектрорадіометра надвисоких частот зображена на мал.1. Вона складається з приймальної системи, аналізатора спектру та реєстратора. Шумоподібний радіосигнал, який містить в собі досліджувану спектральну лінію, з атмосфери попадає на рупорну антену та підводиться до високочутливого супергетеродинного приймача. Супергетеродинний приймач переносить прийнятий спектр по частоті униз, де працює Фур'є спектроаналізатор. Крім спектрального каналу існує ще й радіометричний канал, за допомогою якого здійснюється калібрування системи та вимірюється величина поглинання радіохвиль при проходженні їх крізь тропосферу.

У нашій системі власної розробки спостерігається лінія випромінювання CO на частоті 115 ГГц. В ній використовуються надчутливі змішувач та підсилювач проміжних частот, тож шумова температура приймача не перевищує 300К. Вся станція спостереження розміщується у будівлі, а спостереження проводяться крізь радіо прозоре вікно. Зовнішній вигляд приймальної системи показано на мал. 2.

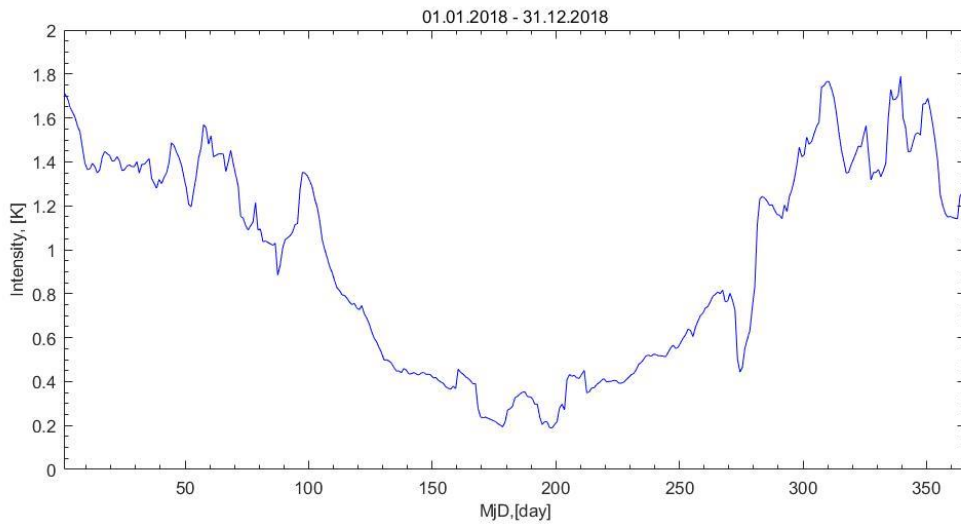


Мал. 1. Структурна схема спектро радіометра надвисоких частот.



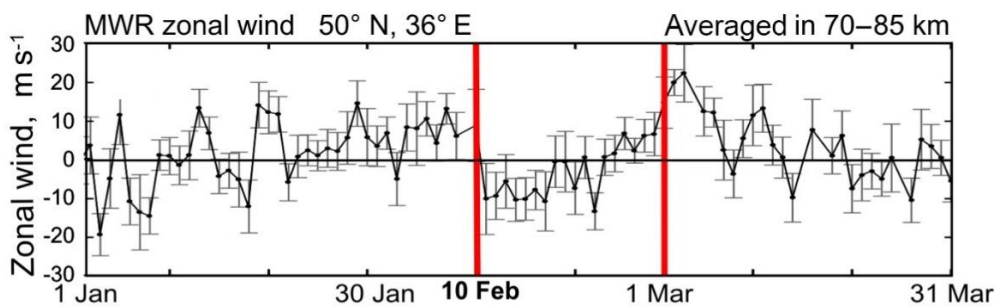
Мал. 2. Зовнішній вигляд приймальної системи спектро радіометра надвисоких частот.

Для станцій наземного базування розроблено декілька методів обробки одержуваних результатів, та навіть найпростіші дають можливість бачити, наприклад, сезоні зміни інтенсивності лінії випромінювання. Приклад таких спостережень за 2018 рік наведено на мал.3. З нього видно, що взимку інтенсивність випромінювання до 7 разів вища за інтенсивність влітку.



Мал. 3. Зміни інтенсивності лінії випромінювання стратосферного CO протягом 2018 р.

Станції наземного базування дозволяють також досліджувати довготривалі стратосферні вітри. Приклад часової залежності швидкості вітру у напрямку схід – захід приведено на мал.4. Двома червоними вертикальними лініями відзначений відрізок часу, впродовж якого спостерігалась довготривала зміна напрямку вітру. Порівняння зі супутниковими даними виявило, що це було «раптове стратосферне потепління». Подібне явище спостерігається раз у 2-3 роки [7].



Мал. 4. Часова залежність швидкості стратосферного вітру у напрямку схід – захід.

Отже наведені приклади свідчать про необхідність створення подібних станцій у якомога більших точках земної кулі. Але для їх створення необхідно виготовлення складної високотехнологічної апаратури. В той же час наш досвід розробки свідчить про доволі невелику потребу у потужності електроживлення подібних станцій. Це відкриває змогу створювати мобільні пересувні пункти спостереження, які можуть базуватися на автомобілі та

проводити спостереження майже з будь-якої географічної точки. Такий підхід може суттєво спростити та здешевити дослідження горішніх шарів атмосфери.

Література

1. С.П. Корольов. 1956. Дослідження верхніх шарів атмосфери за допомогою ракет дальньої дії. Стенограма доповіді С. П. Корольова на Всесоюзній конференції з ракетних досліджень верхніх шарів атмосфери. https://rvsn.ruzhany.info/0_2020/koroljov_1956_01.html
2. Aura MLS, Aura microwave limb sounder: EOS MLS Data Readers, available at: <https://mls.jpl.nasa.gov/data/readers.php>, last access: 15 May 2019
3. Forkman, P., Christensen, O. M., Eriksson, P., Billade, B., Vassilev, V., and Shulga, V. M. 2016. A compact receiver system for simultaneous measurements of mesospheric CO and O₃, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 5, 27–44. <https://doi.org/10.5194/gi-5-27-2016>
4. Hagen, J., Murk, A., Rüfenacht, R., Khaykin, S., Hauchecorne, A., and Kämpfer, N. 2018. WIRA-C: a compact 142-GHz-radiometer for continuous middle-atmospheric wind measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 5007–5024. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5007-2018>
5. Pidtyachiy, V., Shulga, V., Myshenko, V., Korolev, A., Antyufeyev, O., Shulga, D., and Forkman, P. 2017. Microwave radiometer for spectral observations of mesospheric carbon monoxide at 115 GHz over Kharkiv, Ukraine. *J. Infrared Milli. Te.*, 38, 292–302. <https://doi.org/10.1007/s10762-016-0334-1-2017>
6. Корольов О.М., Карелін Ю.В., Антюфєєв О.В., Шульга В.М., Мищенко В.В., Чечоткін Д.Л., Шульга Д.В., Патока О.М., Маринко К.В. Аерономічна радіоспектрометрія з калібруванням за віртуальними джерелами. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2022. Т. 27. № 3. С. 219—228. <https://doi.org/10.15407/rpra27.03.219>
7. Wang, Y., Shulga, V., Milinevsky, G., Patoka, A., Evtushevsky, O., Klekociuk, A., Han, W., Grytsai, A., Shulga, D., Myshenko, V., et al. Winter 2018 major sudden stratospheric warming impact on midlatitude mesosphere from microwave radiometer measurements. *Atmos. Chem. Phys.* 2019, 19, 10303–10317.