

УДК 523.68; 52-622; 52-76

П. Козак, канд. фіз.-мат. наук  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ,  
Л. Козак, канд. фіз.-мат. наук  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

## ПРО МОЖЛИВІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВІЗОРІВ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕННЯ МЕТЕОРІВ ТА ІНШИХ АТМОСФЕРНИХ УТВОРЕНЬ У ДАЛЕКОМУ ІНФРАЧЕРВОНОМУ ДІАПАЗОНІ

*Досліджено характеристики сучасних недорогих тепловізорів для можливих спостережень метеорів та інших атмосферних утворень у далекому інфрачервоному діапазоні 8–14 мкм. Наведено огляд спостережень метеорів у нетрадиційних ділянках спектра: ультрафіолеті, у початковому, близькому, середньому та далекому інфрачервоному діапазонах. Коротко описано сучасну апаратуру для інфрачервоних спостережень. На прикладі сучасної бюджетної моделі тепловізора нижнього цінового сегмента наводяться результати тестових спостережень хмар, потенційних слідів болідів та інверсійних слідів літаків, метеорів і грозових розрядів. Коротко проаналізовано технічні характеристики вибраної моделі та відповідного програмного забезпечення, розглянуто переваги та недоліки цього типу спостережної апаратури. Робиться висновок про перспективу використання тепловізорів у метеорній астрономії та геофізиці.*

*Ключові слова: метеори, метеорні атмосферні сліди, відеоспостереження метеорів, спостереження в далекому інфрачервоному діапазоні, тепловізори, інфрачервоні спостереження атмосферних утворень, інверсійні сліди реактивних літаків.*

**Вступ.** Історично оптичні спостереження метеорів із використанням технічних засобів почалося в епоху розвитку фотографії, і таким чином проводилося в діапазоні довжин хвиль приблизно видимого діапазону. Так, звичайна емульсія на основі бромистого срібла чутлива в області від ультрафіолету до приблизно 550 нм. Сенсibiлізація емульсії продовжувала чутливість фотоматеріалів у бік хвиль більшої довжини: до 600 нм для ортохроматичних емульсій, та приблизно до 700 нм для панхроматичних. Вироблялись також інфрачроматичні емульсії, чутливі до інфрачервоного випромінювання з довжиною хвилі до 1200 нм. У практиці метеорних спостережень (зарубіжних і вітчизняних), як правило використовувалися фотоплівки з чутливістю у видимому діапазоні. У подальшому, із розвитком техніки на зміну фотографічним метеорним спостереженням прийшли спочатку телевізійні, а потім відеоспостереження. Спектральна чутливість їх детекторів при цьому сягала 900–1000 нм. При цьому часто спільні фотографічні й телевізійні спостереження метеорів демонстрували різні висоти появи метеорів (телевізійні метеори з'являлися суттєво раніше). Як пояснення пропонувалися і різні інтегральні чутливості спостережної апаратури, обумовлені, наприклад, різною апертурою вхідної оптики, і різні спектральні чутливості детекторів [1], а саме – чутливість відеокамер у близькій інфрачервоній ділянці спектра (NIR), де метеор міг мати (як показали подальші дослідження – має) емісійні спектральні лінії. Таким чином, розвиток виробництва напівпровідників дозволив не лише підняти чутливість спостережної апаратури, а і проводити дослідження метеорів у нетрадиційних ділянках спектра. Єдиною перешкодою для таких досліджень є селективність атмосферного поглинання світла. Очевидно, область ультрафіолету є недоступною для наземних спостережень метеорів на висотах їх випромінювання 130–80 км через поглинання шаром озону. Також є ряд зон атмосферного поглинання в області інфрачервоних променів парами води та вуглекислого газу (рис. 1).

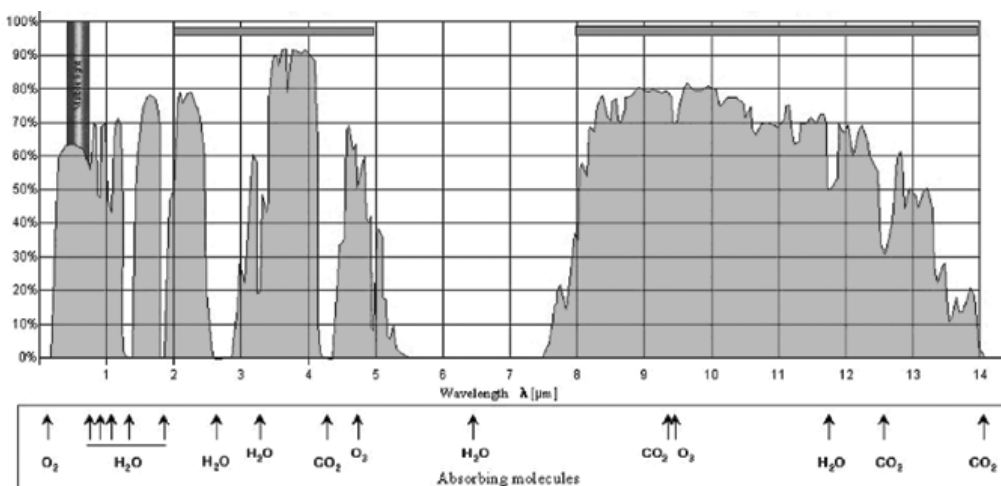


Рис. 1. Вікна пропускання світла атмосферою для різних довжин хвиль (внизу показано хімічні елементи, відповідальні за поглинання в певних ділянках) [2]

**Спостереження метеорів у нетрадиційних ділянках спектра.** Тим не менш, вікна прозорості дозволяють проводити спостереження метеорів у нетрадиційних для метеорів ділянках спектра. Позитивним фактором у цій проблемі є розвиток спостережних засобів космічного базування, які встановлюються на штучних супутниках Землі. Так, під час активності метеорного потоку Леоніди 1999 р. із борту американського супутника Midcourse Space Experiment п'ятьма спектрографами зареєстровано спектр яскравого метеора в діапазоні

110–860 нм [3]. У той час, як у видимому діапазоні було зареєстровано емісії нейтральних атомів FeI, Ni, OI, у діапазоні 220–300 нм реєструвалися значно інтенсивніші іонні лінії FeII та MgII. У ділянці 110–130 нм крім згаданих іонів було ототожнено лінії O та N. Також зокрема знайдено інтенсивне випромінювання водню в лінії  $L\alpha$  та значно слабші лінії нейтрального вуглецю C I. Відмічається, що інтегральна інтенсивність випромінювання в діапазоні 110–337 нм була як мінімум у 5 разів більшою, ніж у видимому діапазоні 337–860 нм. Досвід цих спостережень є унікальним для метеорної астрономії, і не лише з точки зору вивчення хімічного складу метеороїдів, а і для фізики польоту метеора та його взаємодії з атмосферою.

Інші супутникові спостереження земної атмосфери проводяться США з 1972 р. у діапазоні від видимого до інфрачервоного випромінювання (IR) із метою контролю атмосферних ядерних випробовувань. Відмічено у [4], що за цей час було зареєстровано 262 яскраві боліди, з яких 23 були зняті лише у видимому світлі, 212 – лише в IR, та 27 – як у видимому, так і в IR світлі.

Спостереження потоку Леоніди в 1998 р. проводилися вже не з борту космічного апарата, а з літака в межах багатогалузевих авіаційних спостережних кампаній за підтримки НАСА, Європейського космічного агентства та інших організацій. За допомогою спеціально розробленого спектрографа для вимірів в середньохвильовій ділянці інфрачервоного спектра (MWIR) 3–5,5 мкм було зареєстровано два яскраві метеори з потоку Леоніди, причому відмічається, що їх криві блиску в MWIR відрізнялися від кривих у видимому світлі [5]. Аналогічні спостереження з указаним спектрографом проводилися також із борту літака такої ж спостережної кампанії над Середземним морем вже у 1999 р., однак при цьому увага приділялася дослідженню в інфрачервоних променях 3–5,5 мкм залишкових хвостів метеорів [6]. Були ідентифіковані протяжні осцилятивні смуги C-H, які ймовірно належать молекулі CH<sub>4</sub>, а також чіткі емісії CO (емісії CO<sub>2</sub> не виявлено). Паралельні наземні спектральні спостереження потоку Леоніди 1999 р. проводилися в Нью-Мексіко, спектрограф працював в інфрачервоному діапазоні середніх та довгих (LWIR) хвиль 2,5–14,5 мкм [6]. Було зареєстровано 5 слідів метеорів. У діапазоні MWIR смуга емісії CO починалася з 4 мкм і на довжині 4,4 мкм мала дуже інтенсивний пік, який виводив спектрограф у перенасичення. У діапазоні 4,3–7,8 мкм був чітко зафіксований пік емісії молекули CO<sub>2</sub> з максимумом на 4,3 мкм. Емісія водяної пари H<sub>2</sub>O спостерігається вздовж усього спектра. У діапазоні 6,7–7,8 мкм прилад був перенасичений випромінюванням невідомої природи – адже це діапазон інтенсивного поглинання водяною парою і не належить до вікон прозорості атмосфери. У діапазоні LWIR 7,5–14 мкм на фоні світіння холодного неба було виділено абсорбційні лінії невідомої природи на довжинах хвиль 7,7–8,3 мкм та 13–14,5 мкм.

Інші цікаві спостереження були проведені Хорватською метеорною мережею [7] в 2009 та 2012 роках за допомогою чотирьох камер у видимій та NIR областях, причому у двох камерах використовувалися фільтри, які розділяють видимий та NIR діапазони. У третій камері, яка використовувалася опційно, застосовувався неодимовий фільтр, який відсікає типову для метеорів лінію Na, а четверта проводила зйомку в інтегральному світлі. Порівняння кривих блиску показало кілька типів відмінностей: були метеори із практично однаковими кривими блиску, із кривими що сильно відрізняються, та змішаного типу, які важко інтерпретувати. Було зроблено висновок про те, що наявність інтенсивних ліній у NIR-діапазоні прямо корелює із швидкістю метеора.

Схожі, але вже спектральні спостереження були проведені ще раніше в 1985 р. в Японії [8] у NIR-ділянці спектра. Із 10 зареєстрованих метеорів 7 належало до потоку Персеїд. Були ототожені спектральні лінії, що відповідають NIR-мультиплетам Ni, OI та CaII.

Як видно, на сьогодні UV, видимий, NIR 750–1200 нм, та MWIR 3–5,5 мкм діапазони уже тією чи іншою мірою досліджувалися. Залишилися суттєво менше дослідженими вікна короткохвильового інфрачервоного діапазону (SWIR) 1,3–2,6 мкм, та вікно LWIR 7,5–15 мкм (див. рис. 1). Для спостережень у цьому діапазоні інфрачервоних хвиль є ряд розроблених камер, які використовують детектори різних типів. Одним із найвідоміших розробників у даній області є корпорація FLIR, яка сама виробляє детектори випромінювання і спостережні камери як бюджетного, так і класу hi-tech. Спектральні криві чутливості різних типів детекторів для різних довжин хвиль зображено на рис. 2.

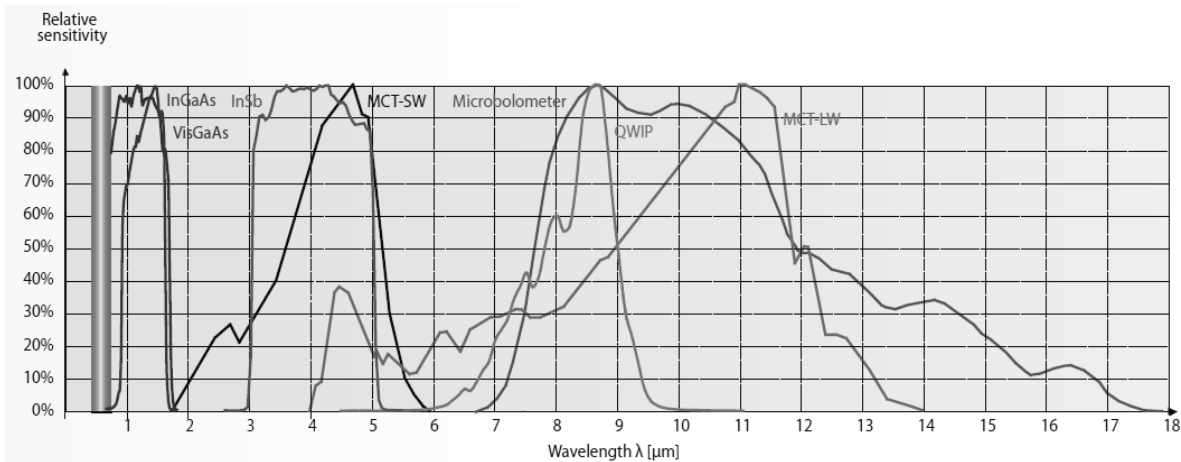


Рис. 2. Спектральні криві чутливості різних детекторів у інфрачервоному діапазоні [2]

За способом виготовлення приймачів інфрачервоного діапазону їх можна розділити на дві групи: приймачі квантового типу, які базуються на фотоелекті в інфрачервоному діапазоні; та температурні приймачі, або болометри. Детектори першого типу виготовляються з різних напівпровідників та їх комбінацій. В основному це індієво-сур'мяні InSb, індієво-галієво-миш'якові InGaAs, платиново-кремнієві, ртутно-кадмієво-телурові HgCdTe (MCT),

та QWIP детектори (Quantum Well Infrared Photon) на основі розшарованих галієво-миш'якових та алюмінієво-галієво-миш'якових сполук GaAs/AlGaAs (рис. 2). Квантові детектори через необхідність їх глибокого охолодження (деякі до 200 K, більшість до 70–77 K [2]) на жаль є досить дорогими. У той же час мікроболометри, чутливість яких становить від 7 до 18 мкм працюють при температурі оточуючого середовища, тобто десь при 30 °C і є досить недорогими. Недоліком їх є низька чутливість. Тим не менш, цей тип детекторів можна спробувати використати для спостережень у вікні атмосферної прозорості 7–14 мкм. Крім спостережень яскравих метеорів (болідів) указаний тип детекторів можна спробувати використовувати для спостережень інших атмосферних утворень, таких як спрайти, ельфи, грозові розряди, мезосферні (сріблясті) хмари, грозові хмари, штучні об'єкти – літаки, їх інверсійні сліди та ін.

**Пробні спостереження в LWIR потоку Персеїди 2019 та інших атмосферних об'єктів.** Однією з камер з нижнього цінового сегмента, яку можна спробувати використати для пробних спостережень метеорів та інших атмосферних транз'єнтів є камера FLIR One Pro корпорації Flir Systems Inc. [2]. Ці камери є мобільними мініатюрними приставками для сучасних смартфонів, й обладнані крім інфрачервоної камери паралельною цифровою відеокамерою видимого спектрального діапазону. Крім того, указані камери є по своїй суті компактними тепловізорами й обладнані відповідною каліброваною температурною шкалою, яка дозволяє визначати яскравісну температуру просторово протяжних об'єктів, за умови, що вони випромінюють за законом абсолютно чорного тіла (планківське випромінювання). Основні характеристики наведеного типу камер подано в табл.

Таблиця

Технічні характеристики тепловізора FLIR One Pro

Робоча температура	0–35 °C
Розмір	65 x 29 x 18 мм
Маса	32 г
Термічний датчик:	
розмір пікселя	12 мкм
спектральний діапазон	8–14 мкм
роздільна здатність	160 x 120 пікселів
Оптичний датчик:	
роздільна здатність	640 x 480 пікселів
Камери:	
поле зору горизонтальне	46° ± 1°
поле зору вертикальне	35° ± 1°
частота кадрів	8,7 Гц
фокусування	фіксоване від 15 см до ∞
накладання зображень	технологія SMX
Діапазон вимірюваних температур	шкала –20...120 °C або –20...400 °C
Батарея, час роботи	1 год
Батарея, час зарядки	40 хв
Зарядка, конектор	Micro-USB (5 В, 1 А)
Запис зображення:	
роздільна здатність	640 x 480 пікселів
Формати файлів, радіометричні знімки	JPEG
формати файлів, відео	MPEG-4
режими запису відео	Відео, знімок, інтервальна зйомка

Для дослідження можливостей камери були проведені пробні спостереження різних атмосферних утворень. У першу чергу спостерігались відносно високі та низькі хмари різних типів та конфігурацій. Типовим для таких спостережень був інтенсивніший рівень випромінювання для хмар візуально темних (у тому числі грозових), очевидно через їх вищу температуру, яка у свою чергу ймовірно пов'язана з більшою концентрацією в них води. У деяких випадках зображення IR та цифрової відеокамери практично повністю антикорелювали (чим темніші хмари у візуальному діапазоні – тим інтенсивніше інфрачервоне випромінювання). На рис. 3 показано такі знімки з обох камер, зроблені у вечірній час.

Більшість зображень добре накладаються одне на одне – найчіткіші з них показані горизонтальними стрілками. Причому, як видно зі знімків, темні хмари розміщені значно нижче, по суті в сутінковій зоні, а вищі (в IR світлі темні ділянки) – вищі й освітлені призахідним сонцем. Тим не менш у деяких випадках IR знімки демонструють особливості, які повністю відсутні на знімках візуального діапазону. Так, на рис. 3 вертикальною стрілкою на IR знімку показана достатньо довга майже вертикальна вузька холодна зона повністю відсутня у видимому світлі. Температурна шкала, пов'язана з яскравістю планківського випромінювання сірого тіла, демонструє перепад температур від –15 °C до +21 °C, і радше може інтерпретуватися як деяка еквівалентна температура, аніж середня температура атмосфери на промені зору. Для подальших спостережень температурна шкала не бралася до уваги.



Рис. 3. Оптичне та IR зображення хмар в сутінковий час

Оскільки основною задачею була перевірка можливості реєстрації метеорів, були проведені тестові спостереження під час максимуму активності метеорного потоку Персеїди 12 серпня 2019 р. Спостереження з IR камерою проводилися паралельно зі спостереженнями з високочутливими камерами Watec WAT-902H2 Ultimate, які нині зазвичай використовуються для метеорних спостережень, паралельно із двох пунктів на базисі близько 122 км. За час спостережень відеокамера Watec зареєструвала понад 20 достатньо слабких метеорів порядку  $+1^m - +3^m$ , та декілька відносно яскравих порядку  $-1^m - 0^m$ . Тим не менш відповідних зображень в IR світлі виявлено не було (паралельна цифрова відеокамера візуального діапазону через слабку чутливість узагалі не давала зображень). В іншому спостережному пункті протягом спостережень був зареєстрований достатньо яскравий болід із блиском близько  $-6^m$ , однак у нашому спостережному пункті в той момент камери були неактивні через підзарядку IR камери. Однак досить цікавим фактом була реєстрація 10 серпня, за два дні до максимуму, у сутінковому небі сліду, схожого на залишковий атмосферний слід боліда. Очевидно, цей слід, показаний на рис. 4, міг бути інверсійним слідом реактивного літака, однак ряд факторів вказує на більшу ймовірність першої версії: слід візуально (у прямому смислі слова, оскільки цифрова вбудована паралельна відеокамера знову нічого не зареєструвала в сутінках через слабку чутливість) був розміщений достатньо високо; він був обмежений за довжиною, а не проходив через усе небо; інтенсивність його була нерівномірна; слід був темного кольору, а не світлий як зазвичай від літака. Очевидно, що даний фактор можливості спостереження слідів болідів у перспективі потребує перевірки.

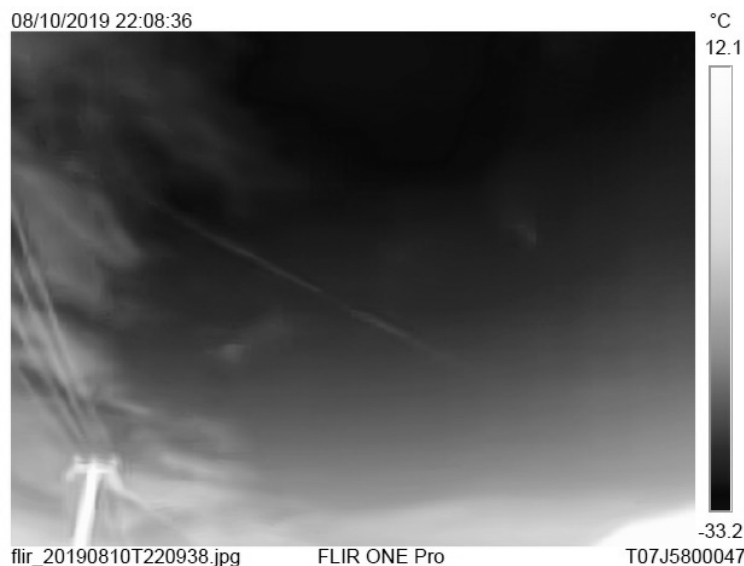


Рис. 4. Зареєстрований IR камерою можливий слід боліда з потоку Персеїди, або інверсійний слід літака

Ще одна нагода перевірити потенціал як IR камери, так і її програмного забезпечення видалася при спостереженні грози 3 жовтня 2019 р. (у цьому році грози були досить рідким явищем). Спостереження проводилися в Києві. Оскільки інші, зовнішні камери не застосовувалися, для реєстрації відео використовувалася програмна функція накладання зображень SMX. Її перевагою є можливість суміщати зображення обох камер – IR та вбудованої цифрової відеокамери шляхом накладання найбільш інтенсивних автоматично виділених контурів відеозображення на повний IR знімок. Планувалось, що такий підхід дозволить побачити або обидва зображення, або лише оптичне за відсутно-

сті IR випромінювання, причому у першому випадку можна було б оцінити можливу часову затримку початку випромінювання в різних спектральних діапазонах. Знімків блискавок було зареєстровано достатньо (разом із записом звуку), один із прикладів зображено на рис. 5.

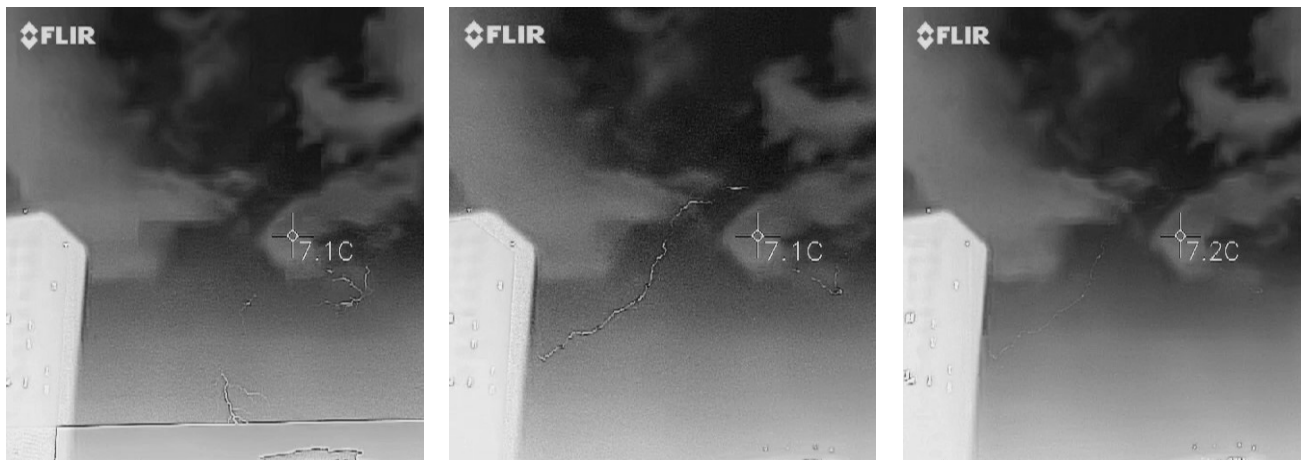


Рис. 5. Три комбіновані за допомогою технології SMX кадри повного інфрачервоного та контурного оптичного зображення послідовного грозового розряду

На рисунку показано три зображення грозового розряду, записані в кадрах 67, 70 та 72 (нумерація внутрішня). Як видно з лівого комбінованого фото розряд почався у правій частині знімка, далі після двокадрової паузи, яка відповідає інтервалу часу близько 0,22 с (частота кадрів складає 8,7 Гц, див. табл. 1), розряд продовжився в ліву частину кадру (центрального знімка), а далі після його відсутності протягом 1 кадру – 0,11 с – з'явився майже вздовж попереднього зображення з деякими зміщеннями і значно слабший за інтенсивністю (правий знімок). Тим не менш, використання технології SMX у цьому випадку себе не виправдало через малу просторову роздільну здатність камер та малу інтенсивність зареєстрованих розрядів. Більше того, указана функція навіть перешкодила ідентифікації потенційно можливого IR зображення. Як видно з рис. 5 (кадр ліворуч) контур із зображення цифрової відеокамери має досить тонкий вигляд (контур даху будинку із самого низу кадру), практично рівний по товщині зображенню грозовому розряду, що унеможливує його належність до якогось одного діапазону випромінювання, чи до обох. З іншого боку, наявне програмне забезпечення не дозволяє розглядати два відеопотоки паралельно, аналогічно до одиночних знімків, хоч очевидно, що рівень електроніки камери має дозволити реєструвати паралельно два відеопотоки – з IR та оптичної відеокамери.

**Висновки.** У вказаному типі тепловізорів, по суті побутового рівня, щодо можливого перспективного застосування для спостереження атмосферних утворень в LWIR діапазоні, є і позитивні, і негативні складові. До плюсів, очевидно, у першу чергу належить наявність інфрачервоної камери болометричного типу із покращеною роздільною здатністю та з низькою ціною. Також позитивом є наявність паралельної цифрової відеокамери візуального діапазону, хоча даний позитив успішно використовується лише при одиночних знімках, а не при відеозйомці. Програмне забезпечення орієнтоване в основному на температурну обробку одиночних знімків. Є сподівання, що в найближчому майбутньому паралельний запис обох відеопотоків для даного типу відеокамер буде реалізований як технічно, так і програмно. Щодо застосування цієї інфрачервоної камери для спостережень атмосферних об'єктів, то ситуація тісно корелює з технічно-програмними можливостями камери. Так, спостереження відносно стаціонарних об'єктів із достатньо інтенсивним випромінюванням в LWIR діапазоні, як наприклад хмар (у тому числі мезосферних), а також можливо метеорних слідів та інверсійних слідів літаків може бути успішно реалізоване уже зараз. Спостереження слабкосвітних та динамічних об'єктів, таких як метеори чи блискавки, потребує паралельних спостережень із зовнішньою чутливою оптичною камерою. Також певним недоліком є робота камери лише від акумулятора протягом години – тобто автоматизація довготривалих спостережень без участі оператора неможлива. Тим не менше – це лише попередні висновки, які базуються на одиночних спостереженнях, і в перспективі необхідне накопичення спостережних даних.

#### Список використаних джерел

1. Meteor luminosity at 160 km altitude from TV observations for bright Leonid meteors / Y. Fujiwara, M. Ueda, Y. Shiba et al. // *Geophysical Research Letters*. – 25. – 8. – 1998. – P. 285–288.
2. The Ultimate Resource Guide for Using Infrared in the Research and Development Industry. – In: *The infrared ultimate handbook for R&D professionals*. – FLIR Systems, Inc. – www.FLIR.com.
3. Leonid meteor spectrum from 110 to 860 nm / J.F. Carbary, D. Morrison, G.J. Romick, J.-H. Yee // *Icarus*. – 161. – 2003. – P. 223–234.
4. Coordinating satellite bolide detection in the visible and infrared with collection of dust in the stratosphere / M.E. Zolensky, P. Brown, E. Tagliaferri, R. Spalding. – *Lunar and Planetary Science Conference 28<sup>th</sup>*. – Houston, TX. – Mar. 17–21. – 1997. – Abstracts. Pt. 3 P–Z. – 1709.pdf.
5. Observations of Leonid meteors using a mid-wave infrared imaging spectrograph / G.S. Rossano, R.W. Russell, D.K. Lynch et al. // *Earth, Moon and Planets*. – 82–83. – 2000. – P. 81–92.
6. Min-infrared spectroscopy of persistent Leonid trains / R.W. Russell, G.S. Rossano, M.A. Chatelain et al. // *Earth, Moon and Planets*. – 82–83. – 2000. – P. 439–456.
7. Meteors in the near-infrared / D. Šegon, Ž. Andrej, D. Vida et al. // *Proceedings of the IMC, La Palma, 2012*. – P. 111–114.
8. *Murayama H.* Near-infrared meteor spectra obtained in 1985 / H. Murayama. – *Tokyo Meteor Network Rep.*, No. 9. – 1990. – P. 53–57.

П. Козак, канд. фіз.-мат. наук  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ,  
Л. Козак, канд. фіз.-мат. наук  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

### О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВИЗОРОВ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ МЕТЕОРОВ И ДРУГИХ АТМОСФЕРНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В ДАЛЕКОМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

*Исследуются характеристики современных недорогих тепловизоров для возможных наблюдений метеоров и других атмосферных образований в далеком инфракрасном диапазоне 8–14 мкм. Приводится обзор наблюдений метеоров в нетрадиционных участках спектра: ультрафиолете, в начальном, ближнем, среднем и дальнем инфракрасных диапазонах. Кратко описывается современная аппаратура для инфракрасных наблюдений. На примере современной бюджетной модели тепловизора нижнего ценового сегмента приводятся результаты тестовых наблюдений облаков, потенциальных следов болидов и инверсионных следов самолетов, метеоров и грозных разрядов. Выполнен краткий анализ технических характеристик выбранной модели и соответствующего программного обеспечения, анализируются преимущества и недостатки данного типа наблюдательной аппаратуры. Делается вывод о перспективе использования тепловизоров в метеорной астрономии и геофизике.*

*Ключевые слова: метеоры, метеорные атмосферные следы, видеонаблюдения метеоров, наблюдения в далеком инфракрасном диапазоне, тепловизоры, инфракрасные наблюдения атмосферных образований, инверсионные следы реактивных самолетов.*

P. Kozak, PhD  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv  
L. Kozak, PhD  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

### ON THE POSSIBILITY OF USING THERMAL VISION CAMERAS FOR OBSERVATIONS OF METEORS AND OTHER ATMOSPHERIC FORMATIONS IN LONG WAVE INFRARED

*The characteristics of the modern low-cost thermal vision cameras for possible observations of meteors and other atmospheric formations in long wave infrared spectrum range of 8-14  $\mu\text{m}$  are investigated. An overview of meteor observations in non-traditional spectrum ranges: ultra-violet, near infrared, short wave, mid wave, and long wave infrared is done. A short description of the modern instruments for infrared observations is presented. By the example of a modern inexpensive model of thermal vision camera of the lower price segment there are presented results of test observations of clouds, possible atmospheric bolide tails and inversion tracks of airplanes, meteors, and thunderstorm discharges. A short analysis of technical characteristics of the selected model, and corresponding software is given, the merits and demerits of the given type of observational instruments are analyzed as well. The conclusion for outlook of using in the future the thermal vision cameras in meteor astronomy and geophysics is done.*

*Keywords: meteors, meteor atmospheric tails, video observations of meteors, observations in long wave infrared, thermal vision cameras, infrared observations of atmosphere formations, inversion tracks of airplanes.*

УДК 521.31; 535.361; 551.521; 551.593

В. Данилевський, канд. фіз.-мат. наук  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

### ОЦІНКИ ПРЯМОГО РАДІАЦІЙНОГО ЕФЕКТУ АЕРОЗОЛІВ У АТМОСФЕРІ НАД КИЄВОМ ЗА ВИМІРЮВАННЯМИ ІЗ СОНЯЧНИМ ФОТОМЕТРОМ У 2008–2019 РОКИ

*Наведено короткий огляд проблеми впливу аерозолів на енергетичний баланс земної кліматичної системи загалом та атмосфери зокрема. Проаналізовано літературні джерела, у яких зроблено такі оцінки, наведено основні характеристики аерозолів, необхідні для кількісного оцінювання їхніх кліматологічних ефектів. Сформульовано основні поняття, що використовуються при оцінюванні впливу зовнішніх та внутрішніх чинників кліматичної системи на її енергетичний баланс. Коротко викладено основні риси алгоритмів для обчислень так званого радіаційного форсингу за даними спостережень у міжнародній мережі сонячних фотометрів AERONET. Наведено оцінки аерозольного радіаційного форсингу, що одержані за спостереженнями із сонячним фотометром AERONET у Києві, починаючи із 2008 р. Подано порівняння даних для Києва з даними для інших урбанізованих регіонів планети.*

*Ключові слова: аерозоль, енергетичний баланс атмосфери, радіаційний форсинг, AERONET.*

**Вступ.** Дослідженням вмісту аерозолів у земній атмосфері, його динаміки та фізичної природи й характеристик аерозольних частинок приділяється значна увага науковцями, урядовими структурами та громадськими організаціями багатьох країн світу, міжнародними організаціями, як одному з важливих кліматичних та метеорологічних чинників. Зокрема це пов'язано із проблемою адекватного оцінювання впливу життєдіяльності людства (антропогенного чинника) на зміни клімату Землі у регіональному і глобальному масштабах [1–3]. Аерозоль впливає на формування клімату двома головними шляхами: по-перше, він безпосередньо змінює прозорість атмосфери для сонячного випромінювання залежно від вмісту в атмосфері та від оптичних і мікрофізичних властивостей аерозольних частинок (прямий ефект), а по-друге, аерозольні частинки в атмосфері за відповідних метеорологічних умов стають ядрами конденсації водяної пари і таким чином впливають на інтенсивність формування хмар (непрямий аерозольний ефект) [1]. Внесок аерозолів у перерозподіл сонячної енергії в атмосфері трансформується у відповідні метеорологічні процеси та зміни кліматичних умов, див. наприклад [4, 5].

Розподіл аерозолів у атмосфері пов'язаний із локалізацією джерел його надходження у атмосферу і тому дуже неоднорідний у просторі та часі. Надходження аерозолів у атмосферу може змінюватись унаслідок природних або антропогенних подій. Так, вміст аерозолів природного походження, наприклад, таких як двоокис сірки і попел унаслідок вивержень вулканів, значно збільшується за короткий час, проте через рідкісність таких явищ він відносно швидко (за місяці й роки) зменшується. Ще короткий час перебування в атмосфері частинок пилу після сильних пилових