

A. N. Alexandrov, Ph. D.,
V. I. Zhdanov, Dr. Sci.
Astronomical observatory of National Taras Shevchenko University of Kyiv

TIME DELAY OF CRITICAL IMAGES OF A POINT SOURCE NEAR THE GRAVITATIONAL LENS FOLD-CAUSTIC

Within the framework of the analytical theory of the gravitational lensing we derive asymptotic formula for the time delay of critical images of a point source, which is situated near a fold-caustic. We found corrections of the first and second order in powers of a parameter, which describes closeness of the source to the caustic. Our formula modifies earlier result by Congdon, Keeton & Nordgren (MNRAS, 2008) obtained in zero-order approximation. We have proved the hypothesis put forward by these authors that the first-order correction to the relative time delay of two critical images is identically zero. The contribution of the corrections is illustrated in model example by comparison with exact expression.

Надійшла до редколегії 30.06.15

УДК 551.510

Л. Козак, канд. фіз.-мат. наук, КНУ імені Тараса Шевченка,
А. Одзимек, канд. фіз.-мат. наук, інститут Геофізики Польської академії наук,
В. Івченко, д-р. фіз.-мат. наук, П. Козак, канд. фіз.-мат. наук,
І. Галя, асп., В. Лапчук, зав. учб. лаб., КНУ імені Тараса Шевченка

ОПТИЧНІ ЕФЕКТИ ВІД ВИСОТНИХ ГРОЗОВИХ РОЗРЯДІВ В АТМОСФЕРІ ЗЕМЛІ

Вказано закономірності появи швидкоплинних оптичних явищ в атмосфері Землі та особливості їх наземних спостережень. Використовуючи відеоспостереження, отримані в інституті геофізики Польської академії наук, оцінено енергію світіння атмосфери від даних процесів в оптичному діапазоні. Калібровочну криву побудовано за позафокальними зображеннями Веги. Було враховано спектр зірки, коефіцієнт поглинання в атмосфері, характеристики камери.

Ключові слова: швидкоплинні оптичні явища в атмосфері Землі, фотометрія протяжних об'єктів, енергетика висотних розрядів.

Вступ. Швидкоплинні оптичні явища (TLE) які простягаються від верхньої частини грозових хмар аж до висот 90–100 км дають прямий доказ зв'язку нижніх шарів атмосфери з іоносферою [1]. В свою чергу хмари відіграють важливу роль в зміні радіаційного режиму підстилаючої поверхні та атмосфери, і тому суттєво впливають на зміну погоди [2].

Випадкове відкриття спрайтів в 1989 році дало новий поштовх до аналізу як самих швидкоплинних оптичних явищ, так і грозових розрядів в атмосфері Землі. Крім того, залишається багато незрозумілого і при розгляді самих блискавок, як лінійних, так і кулястих [3].

Не менш важливим є усвідомлення ролі грозових хмар як основних джерел електричного поля в тропосфері та стратосфері Землі.

Спостереження за грозовими хмарами проводяться в усіх частотних діапазонах електромагнітних хвиль, починаючи від ультранизьких (3÷30 Гц) і закінчуючи діапазоном γ -випромінювань. Існує декілька методів реєстрації грозових розрядів [4]. Серед них можна виділити: фотографічні виміри, визначення електромагнітних полів та електричних струмів, акустичні виміри та ін.

В рамках даної роботи проведено огляд і аналіз умов виникнення швидкоплинних оптичних явищ в атмосфері Землі, таких як: спрайти, ельфи, блакитні джети і блискавки вгору. Вказані закономірності їх виникнення і проявів.

Опрацьовано два відео TLE явищ і оцінено енергію, тривалість та потужність світіння нічного неба в оптичному діапазоні довжин хвиль.

Спостережні особливості TLE явищ в атмосфері Землі. Незважаючи на наявні спостережні дані, питання про фізичні механізми виникнення спрайтів, джетів та ельфів залишаються відкритими. Порівняльні характеристики швидкоплинних оптичних явищ в атмосфері Землі зібрано в таблиці 1 [1, 5, 6].

Таблиця 1. Порівняльні характеристики TLE явищ

Характеристика	Спрайт	Ельф	Синій джет	Гігантський джет
Колір	червоний верх, синій низ	Червоно-оранжевий	рожевий низ, синій верх	Синій
Величина макс. струму розряду блискавки	> 50 кА	> 100 кА	–	–
Радіовипромінювання	низька частота	середня частота	?	низька частота
Діапазон висот	30–95 км	75–105 км	хмара – 40км	хмара – 95км
Затримка після розряду блискавки	1–100 мс	325 мкс	–	–
Горизонтальні розміри	1–100 км	100–500 км	~ 2 км	40 км
Область виникнення	Іоносфера (шар D)	Іоносфера (шар E, ніч)	стратосфера	стратосфера – іоносфера
Рік відкриття	1989	1992	1989	2001

До матеріалу занесеного в таблицю можна додати, що виділяють декілька морфологічних типів спрайтів – стовпоподібні спрайти, або с-спрайти (дуже вузькі (порядку 1 км), квазінеперервні, майже вертикальні колони) та класичні "морквяні" ("saagot") спрайти, що мають групу відгалужень донизу, які сходяться у вигляді перевернутого конуса. Переважна більшість спрайтів продукується +CG-розрядами (cloud-to-ground), які переносять позитивний заряд з верхівки грозової хмари на землю [1, 7].

При ельфах світло поширюється кільцем, яке розширюється в радіальному напрямку зі швидкістю світла [1, 5].

Ельф, що виникає безпосередньо перед початковою фазою спрайту називають, ще галом спрайта. Він характеризується тільки слабшою іонізацією навколишнього газу.

Блакитні джети беруть початок з верхівки грозових хмар, поширюються зі швидкістю ~ 200 км/с і досягають висот 30–40 км [8]. Гігантські джети були описані як "гібрид синього джета і спрайта" (верхня частина нагадує спрайт, нижня – джет).

Особливості наземних спостережень та використана апаратура. Незважаючи на те, що TLE явища охоплюють значні простори у верхніх шарах атмосфери зафіксувати їх із Землі досить складно, так як існують вони надзвичайно короткий проміжок часу, і виникають в недоступних досліднику місцях. До того ж спрайти формуються на висоті 50–100 км, над грозою, і від Землі надійно закриті хмарами. Спостереження таких явищ зазвичай проводять з орбітальних космічних апаратів, висотних літаків або з високогірних районів земної поверхні з відстані кілька сотень кілометрів [7]. При спостереженні із землі спостерігач повинен знаходитись не менше ніж на 100 км від грозового розряду, і проводити спостереження в діапазоні висот від 30–40 до 90 км. Тоді є шанс зафіксувати швидкоплинні оптичні явища.

В даній роботі були використані базисні відеоспостереження в оптичному діапазоні отримані на базі відділення фізики атмосфери інституту геофізики Польської академії наук 19 серпня 2012. Положення грози було визначено за допомогою супутникових карт.

Вигляд установки для спостережень подано на рис. 1. Вона складається з обов'язкових елементів: об'єктиву Computar M1614, $f = 16$ мм, аналогової ТВ камери Watec LLTV 902H, фреймграбера Pinnacle DVD recorder для оцифровки відеосигналу та ноутбука зі встановленим на ньому програмним забезпеченням UFO Capture V2. Серед обов'язкових елементів: GPS приймач, часовий пристрій, поворотний пристрій.

В камері Watec LLTV 902H використовується ПЗЗ матриця Sony ICX249AL, форматом 752(H)×582(V) ефективних елементів, розмір елементу 8.6 мкм (H)×8.3 мкм (V) (площа елементу $7,138 \times 10^{-7}$ см²), розгортка 2:1 черезрядкова, час експозиції одного поля 1/50 сек. Кутовий розмір поля зору камери з 16 мм об'єктивом – 21×26 град. Максимальна спостережна зоряна величина – близько 5^m.

Програмне забезпечення UFO дозволяє зберігати лише ті зображення, в яких відбулися зміни в полі зору камери, та по 29 кадрів до і після змін. Це надзвичайно спрощує опрацювання телевізійних спостережень, оскільки не потрібно переглядати весь записаний матеріал, та дозволяє суттєво зменшити розмір відео інформації.

Перед опрацюванням даних було проведено дослідження камери з робочим об'єктивом на наявність геометричних спотворень та нерівномірності чутливості по полю зору. В результаті виявилось, що на краях кадру присутні невеликі геометричні спотворення (< 1,5 %), які можна не враховувати, оскільки об'єкти спостереження знаходились поблизу центру кадру. Аналіз фотометричної похибки поля зору камери показав, що її величина для країв кадру не перевищує 10 % і для наших оцінок не відіграє суттєвої ролі.

Для фотометричної обробки даних проводилася калібровка приладу, для того щоб перевести величину сигналу на знімках (кадрах) в енергетичні одиниці, за якими можна легко розрахувати світлову енергію для зображень не точкових об'єктів (в оптичному діапазоні), в т.ч. і від швидкоплинних оптичних явищ.

При побудові калібрувальної кривої було використано 9 позафокальних зображень Веги з різним ступенем розфокусування (тобто зображень різного діаметру, і значить, різної освітленості, за якими побудована залежність вихідного сигналу від освітленості фотоприймача. Для підвищення точності калібровки камери проводилось усереднення фону і зображень Веги (по ~ 29 кадрах) та врахування атмосферної екстинції (зенітна відстань Веги при спостереженнях $z = 59^\circ$).

З усередненого фото Веги було визначено інтенсивність (на знімку) Веги, інтенсивність фону (ділянки кадру, вільної від об'єктів) та площу зображення Веги.

Кінцева інтенсивність Веги – це інтенсивність Веги на кадрі мінус інтенсивність фону. При цьому для переведення площі Веги в см² розмір Веги в пікс² помножили на розмір одного пікселя, який становить $7,138 \times 10^{-7}$ см². Розрахунок світлового потоку, що реєструється камерою, проводився за формулою:

$$F = \omega S_{об} \Delta t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\alpha Lyr}(\lambda) k_o(\lambda) p_z(\lambda) S_{кам}(\lambda) d\lambda,$$

де ω – тілесний кут відповідний розфокусованому зображенню Веги, $S_{об}$ – площа вхідної зони об'єктива, Δt – час експозиції, $E_{\alpha Lyr}(\lambda)$ – спектральна густина випромінювання Веги [9], $k_o(\lambda)$ – коефіцієнт пропускання оптики (для розрахунків було прийнято значення $k_o = 0.8$), $p_z(\lambda)$ – коефіцієнт пропускання атмосфери на заданій зенітній відстані, $S_{кам}(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт чутливості ПЗЗ, а $\lambda_2 - \lambda_1$ – спектральний діапазон чутливості камери.

Отримана за різними позафокальними зображеннями Веги залежність зареєстрованого сигналу від потоку енергії на одиницю площі (калібрувальна крива) подана на рис. 2. Точки – це отримані дані, пряма лінія – апроксимація.

Оцінка енергії спостережних TLE процесів. Визначення енергії світіння атмосфери Землі при TLE явищах проводилось в декілька етапів:

І. За допомогою програмного забезпечення для кадрів де спостерігається світіння віднімався фон. При цьому вважались фоновими перші 29 кадрів (так як при зйомці відео подія, яка нас цікавить, починається лише з 30 кадру, це особливість детектуючої програми UFO). Зображення перших 29 кадрів при цьому підсумувались. Таким чином із відео було виключено всі стаціонарні об'єкти такі як зорі та ін.



Рис. 1. Фото установки для спостережень швидкоплинних оптичних явищ

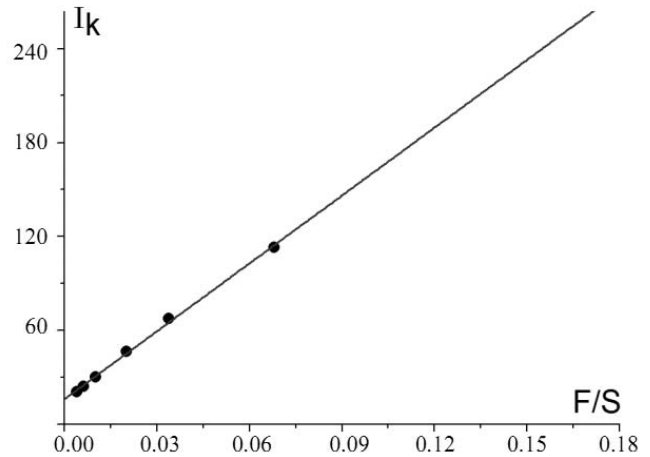


Рис. 2. Калібрувальна крива

II. Після віднімання фону відео було розбито на кадри (окремо, як картинка, зберігався кожен кадр).

III. Оскільки ми маємо неточковий об'єкт, то для кожного кадру зі світінням будували ізофоти (ділянки однакової освітленості).

Приклад ізофот з одного кадру для ельфа та спрайта подано на рис. 3 та 4 відповідно.

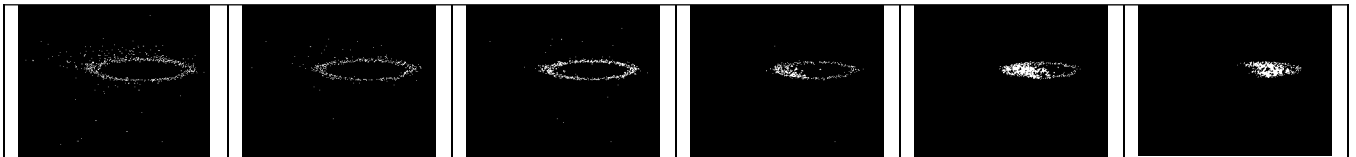


Рис. 3. Ізофоти світіння ельфа для одного кадру

IV. Знаходили площу в пікс² кожної ізофоти. Переводили її в см², помноживши на площу пікселя.

V. Знаючи площу ізофоти, відповідну їй освітленість (з калібрувальної кривої) ми змогли знайти потік, який їй відповідає, тобто, добуток освітленості на площу. Для знаходження повного потоку, що формує зображення, було використано формулу:

$$F = \sum_{i=1}^N E_{\text{isof}(i)} \cdot S_{\text{isof}(i)}$$

де N – повне число ізофот для даного кадру, S_{isof} – площа ізофоти, E_{isof} – освітленість, що їй відповідає.

VI. Для знаходження енергії отриманої впродовж одного кадру, потік множився на його тривалість (відео знімається з частотою 50 кадрів за секунду, тому час одного кадру $t = 0,02$ с).

$$W' = F \cdot t$$

де F – потік за один кадр, t – тривалість кадру.

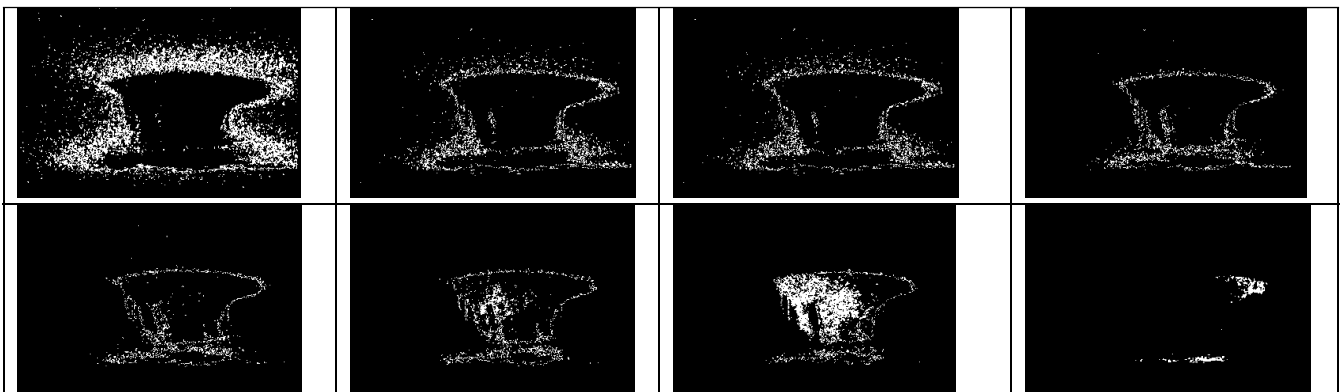


Рис. 4. Ізофоти світіння спрайта для одного кадру

VII. Визначення енергії в оптичному діапазоні від TLE, що потрапила до нашого об'єктива, зводився до сумування енергії кожного кадру:

$$\tilde{W} = \sum_1^k F \cdot t$$

де k – повне число кадрів на яких зареєстровано грозовий розряд.

VIII. Знаходження повної енергії від TLE:

$$W_{\text{повн}} = 4\pi R^2 \tilde{W} / S_{\text{об}},$$

де, R – відстань до світіння, $S_{\text{об}}$ – площа об'єктиву.

IX. Потужність світіння визначалася співвідношенням – $P = W_{\text{повн}} / t_{\text{світіння}}$, де $t_{\text{світіння}}$ – знаходиться множенням кількості кадрів на яких спостерігається світіння атмосфери на тривалість одного кадру – 0.02 сек.

Слід відмітити, що для ізотоп ельфа (рис. 3) спостерігається еліпсоїдальна зміна інтенсивності від краю, до центру.

Результати опрацювання спостережень 2-х відео із зафіксованими швидкоплинними оптичними явищами представлено в таблиці 2.

Слід відмітити, що ми маємо тільки оцінку енергії від швидкоплинних оптичних явищ, оскільки випромінювання розповсюджувалось в атмосфері, де досить багато негативних факторів для проходження світла (пил, теплові флуктуації параметрів, забруднення повітря), це все призводить до його розсіяння та поглинання.

Крім того, наприклад, за оцінками для грозових розрядів, на спектральний діапазон 400–1000 нм припадає лише біля 1 % від всієї енергії, яка випромінюється [3, 4, 10].

Таблиця 2. Оцінка енергії TLE явищ в оптичному діапазоні

№	TLE		Енергія $W, 10^3$ Дж	Тривалість світіння, $t_{\text{світ}}$, сек	Потужність $P, 10^3$ Вт
	Час	Явище			
1	01:35:42	Ельф	0.47	0.18	2.61
2		Спрайт	0.64	0.24	2.67
3		Серія спрайтів	1.29	0.62	2.08
4	02:16:34	Спрайт	1.05	0.28	3.75
5		Серія спрайтів	1.5	0.84	1.79
6		Колоноподібні спрайти	0.07	0.30	0.23

Таким чином, можна вважати, що повна енергія від TLE явищ може буде на два порядки вища ніж розрахована нами.

Висновки. Під час виконання роботи було зроблено загальний огляд та аналіз умов виникнення швидкоплинних оптичних явищ в атмосфері, а саме: спрайтів, ельфів, блакитних та гігантських джетів. Вказано закономірності їх появи, проявів та особливостей спостереження.

Опрацьовано два відео з зафіксованими TLE явищами в атмосфері Землі в результаті яких можна виділити наступні закономірності:

- спрайти фіксувались в основному цілими серіями;
- спостерігались одночасно спрайти різних типів – "колоноподібні" та "морквяноподібні";
- ельфи виникають перед спрайтами;
- перед першим спрайтом із серії спрайтів спостерігається гало;
- ельфи (гало спрайта) виникають на висотах ~82 км; характерні масштаби ~10×60 км; тривалість світіння менше 0.18 сек;
- енергія TLE явищ змінюється в межах 0.07–1.29 кДж;
- тривалість світіння атмосфери (0,18–0,84) сек;
- потужність (0.23–3.75) 10^3 Вт.

Робота виконана в рамках комплексної програми НАН України з космічних досліджень на 2012–1016, в рамках освітньої програми No.2201250 Міністерства освіти і науки України.

Список використаних джерел

1. Füllekrug M., Mareev E.A., Rycroft M.J. Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges – Nato Science Series II. – 2006. – Vol. 225. – 398 p.
2. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Хворостьянов В.И. Облака и климат. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1986. – 512 с.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – Москва: ИД Интеллект, 2009. – 736 с.
4. Uman M.A. The Art and Science of Lightning Protection. – Cambridge: Univ. Press., 2008. – 239 p.
5. Шуенко О.В., Козак Л.В., Івченко В.М. Швидкоплинні оптичні явища під час гроз та моделювання електричних полів у нижній атмосфері // Космічна наука і технологія – 2010. – Т. 16. № 2. – С. 23–34.
6. Pasko V.P., Stanley M. A., Mathews, J. D., Inan U.S., Wood T.G. Electrical discharge from a thunderstorm top to the lower ionosphere // Nature. – 2002. – Vol. 416. – P. 152–154.
7. Blanc E., Farges T., Roche R., Brebion D., Hua T., Labarthe A., Melnikov V. Nadir observations of sprites from the International Space Station // J. Geophys. Res.: Space Physics. – 2004. – Vol. 109, A02306. – doi:10.1029/2003JA009972.
8. Wescott E. M., Sentman D.D., Stenbaek-Nielsen H.C., Huet P., Heavner M.J., Moudry D.R. New evidence for the brightness and ionisation of blue starters and blue jets. // J. Geophys. Res.: Space Physics. – 2001. – Vol. 106, N A10. – P. 21549–21554.
9. Глушнева И.Н., Волошина И.Б., Дорошенко В.Т. и др. Спектроскопия ярких звезд – Москва: Наука, 1982. – 256 с.
10. Rakov V.A., Uman M.A., Rambo K.J. A review of ten years of triggered-lightning experiments at Camp Blanding, Florida // Atmosphere Res. – 2005. – Vol. 76, N 1–4. – P. 504–518.

Надійшла до редколегії 01.01.15

Л. Козак, канд. физ.-мат. наук, КНУ імені Тараса Шевченка,
 А. Одзимек, канд. физ.-мат. наук, інститут Геофізики Польської академії наук,
 В. Івченко, д-р. физ.-мат. наук, П. Козак, канд. физ.-мат. наук,
 И. Гала, асп., В. Лапчук, зав. учеб. лаб., КНУ імені Тараса Шевченка

ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ОТ ВЫСОТНЫХ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Указано закономірності появи короткочасних оптичних явищ в атмосфері Землі і особливості їх наземних спостережень. Використовуючи відеонаблюдення, отримані в інституті геофізики Польської академії наук, оцінена енергія свечення ат-