

**Х.В. Бурштинська, А.В. Бабушка**  
Національний університет “Львівська політехніка”

## **ВПЛИВ АТМОСФЕРИ НА ПОСЛАБЛЕННЯ ЛАЗЕРНОГО ПРОМЕНЯ ПРИ СКАНУВАННІ МІСЦЕВОСТІ**

© Бурштинська Х.В., Бабушка А.В., 2013

*Рассмотрены факторы, влияющие на ослабление лазерного излучения в атмосфере.  
Рассчитаны коэффициенты аэрозольного ослабления и коэффициенты молекулярного  
рассеяния лазерного сигнала.*

*The factors affecting the attenuation of laser radiation in the atmosphere are considered.  
The coefficients of the aerosol extinction and coefficients molecular scattering  
of the laser signal are calculated.*

**Постановка проблеми. Зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями.** Застосування повітряного лазерного сканування для картографування земної поверхні, а також для багатьох інженерно-вишукувальних та екологічних задач, стало звичною практикою. Велика продуктивність знімання, точність, а також швидке отримання кінцевого результату свідчить про доцільність застосування цього методу. З'являються нові моделі лазерних сканерів, створені для виконання конкретних задач. Ціни на такі системи поступово знижуються. В Україні також з'являються фірми, які пропонують послуги, пов'язані із застосуванням повітряних лазерних сканерів. Бум використання таких систем у нас пророкують на період, коли буде знято мораторій на продаж земель сільськогосподарського призначення.

Водночас застосування таких нових систем пов'язане з розв'язанням невирішених задач. Однією з таких задач для лазерного сканування є зниження продуктивності під час сканування гідрографічних об'єктів, а також у несприятливих погодних умовах (дощ, сніг, туман), що, своєю чергою, призводить до зменшення точності кінцевої продукції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, присвячених розв'язанню цієї проблеми.** При створенні топографічних планів та карт за даними авіаційного лазерного сканування важливим є точне відображення об'єктів гідрографії земної поверхні, які також повинні бути включені в побудову цифрових моделей рельєфу [3].

Окремим видом лазерних сканувальних систем є батиметричні лідари, які призначені для картографування рельєфу дна річок, а також приберегових смуг морів та океанів. Необхідність створення таких систем пов'язана з тим, що більшість лазерних сканерів працюють у близькому інфрачервоному діапазоні, сигнали якого добре відбиваються рослинністю, але не проникають крізь товщу води. Тому в додаток до лазера інфрачервоного діапазону використовують лазер, який працює в зеленій ділянці електромагнітних хвиль з довжиною хвилі 532 нм. Його випромінювання проникає крізь воду і відбивається від дна водойми. Глибина проникнення за чистої води становить 50–60 м залежно від моделі сканера. Слід зауважити, що такі системи створено саме для дослідження водних об'єктів, тому вони працюють з меншою частотою сканування, а це в результаті дає меншу кількість зафіксованих сигналів, ніж за сканування топографічним лідаром. Але за використання лідарів саме з топографічною метою недоцільно (насамперед з економічних причин) додатково проводити батиметричне знімання об'єктів гідрографії. Тому треба максимально використовувати дані топографічного лідара для відображення гідрографічних об'єктів.

Враховуючи таку особливість лазерних сканерів, що вони працюють у близькому інфрачервоному діапазоні, точність ЦМР в місцях розташування водних об'єктів погіршується через значно меншу кількість вимірних точок на поверхні землі [1]. На кількість відбитих сигналів також впливає та обставина, що поверхня води відбиває лазерний промінь дзеркально, а це також значно зменшує кількість зареєстрованих сигналів [2, 4, 6]. До цих двох чинників – поглинання водою лазерного випромінювання близького інфрачервоного діапазону і дзеркального відбиття – потрібно ще додати вплив атмосфери на послаблення лазерного імпульсу [5]. На цю обставину слід зважати під час знімання у несприятливих погодних умовах.

**Постановка завдання.** Метою дослідження було розрахувати показник послаблення лазерних сигналів за різного стану атмосфери.

**Виклад основного матеріалу.** Вплив атмосфери на лазерне випромінювання, яке в ній розповсюджується, зводиться загалом до впливу трьох чинників: послаблення випромінювання, викликаного розсіюванням і поглинанням, астрономічної рефракції і турбулентного викривлення лазерних променів.

Загальне послаблення випромінювання в атмосфері відбувається за рахунок селективного поглинання газовими компонентами, аерозольного поглинання і розсіювання та молекулярного розсіювання на молекулах газу.

У діапазоні довжин хвиль, більших за 1 мкм, переважно послаблює випромінювання селективне поглинання. Основними поглинальними газами в інфрачервоній ділянці спектра в атмосфері є водяна пара, вуглекислий газ, озон і кисень [6]. Крім того, атмосфера містить невеликі домішки газів, які також можуть поглинати випромінювання в інфрачервоній ділянці – це насамперед оксид вуглецю, метан, оксиди азоту. А також в окремих районах в атмосфері можуть міститись різні промислові гази, які теж мають властивість поглинати енергію. Поглинання в ближній і середній інфрачервоній ділянках спектра в основному обумовлено коливально-обертальними лініями [5]. При цьому сильні лінії поглинання розташовані в середній інфрачервоній зоні. У близькій інфрачервоній зоні ці лінії слабші. Тому для лазерної локації найперспективнішими довжинами хвиль є ті, які потрапляють у “вікна прозорості” атмосфери. Найбільше значення мають вікна прозорості оптичного діапазону – 0,95...1,06; 1,2...1,3; 1,5...1,8; 2,1...2,4; 3,3...4,0; 8,0...12,0 мкм. Тим не менше кожна смуга поглинання складається з великої кількості ліній сильного поглинання, а кожне вікно прозорості складається з ліній слабого поглинання. В межах одного вікна прозорості існує багато “мікрівікон прозорості” між двома “слабкими” лініями поглинання. Саме ці “мікрівікна прозорості” є важливими для лазерної локації, оскільки лазерне випромінювання може сильно поглинатись у “вікнах прозорості”, якщо спектральна лінія випромінювання лазера збігається з спектральною лінією поглинання. Тому частоту лазера підбирають так, щоб вона була у вікні прозорості і потрапляла між двома сусідніми лініями поглинання, що дає змогу нехтувати цим видом послаблення сигналу.

Результати експериментальних досліджень, які проводяться в світі [9], показують, що значно впливає на зменшення інтенсивності лазерного сигналу атмосфера [5, 9]. Недоліком експериментальних досліджень є те, що вони справедливі лише для тих метеорологічних умов, в яких проводилось дослідження.

Наступним чинником, який впливає на послаблення лазерного випромінювання, є розсіювання і поглинання аерозольними частинками. Аерозолі за своєю природою є різноманітними за формою, походженням та хімічним складом. Існує велика кількість моделей аерозольної атмосфери, які дають можливість достатньо точно оцінити послаблення лазерного променя.

Основними оптичними параметрами, які визначають процес перенесення випромінювання в атмосфері, є показники розсіювання  $\sigma$  і поглинання  $\kappa$ . Послаблення  $\varepsilon$  визначається за формулою:

$$\varepsilon = \sigma + \kappa. \quad (1)$$

У задачах лазерної локації для розрахунку показників послаблення, розсіювання і поглинання в різних метеорологічних умовах зазвичай використовують емпіричні співвідношення, отримані з експериментальних досліджень.

Завдяки дослідженням, які проводили в приземному шарі атмосфери, виділяють такі типи оптичної погоди [5]:

- серпанок, за якого метеорологічна дальність видимості  $S_M \geq 3$  км;
- туманний серпанок з характерними значеннями  $1 \text{ км} \leq S_M \leq 3 \text{ км}$ ;
- хмари, тумани,  $S_M < 1$  км.

90 % часу атмосфера перебуває в стані серпанку і туманного серпанку, тому це є типові умови під час проведення лазерної локації. Для інтегрального врахування впливу атмосфери на результати лазерних вимірювань виділяють основні періоди, пов'язані із сезонними змінами, протягом яких властивості атмосферних серпанків є однотипними: зимовий, літній і весняно-осінній. Показник аерозольного послаблення  $\epsilon$  в умовах атмосферного серпанку визначається за формулою [8]:

$$\epsilon(\lambda) = \epsilon(\lambda_0) [k_0 + k_1 \lambda^{-k_2}], \quad (2)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання;  $\epsilon(\lambda_0)$  – показник аерозольного послаблення за довжини хвилі 0,55 км;  $k_0, k_1, k_2$  – емпіричні коефіцієнти, залежні від погодних умов.

Значення емпіричних коефіцієнтів  $k_0, k_1, k_2$ , розраховані за експериментальними даними для різних типів серпанку, подано в табл. 1 [5, 8].

Таблиця 1

**Значення емпіричних коефіцієнтів  $k_0, k_1, k_2$**

Періоди	Тип аерозолю	$k_0$	$k_1$	$k_2$
Зимовий	“Льодяний” серпанок	0,248	0,447	1,24
	Зимовий серпанок	0,000	0,580	1,24
	Серпанок зі снігом	0,770	0,145	1,24
Весняно-осінній	Стійкий серпанок	0,040	0,585	1,02
	Туманний серпанок	0,116	0,690	0,56
	Серпанок з мжичкою	0,275	0,455	1,09
Літній	Після сильного дощу	0,000	0,400	1,88
	Стійкий серпанок	0,060	0,360	1,88

Значення  $\epsilon(\lambda_0)$  знаходять за формулою

$$\epsilon(\lambda_0) = \frac{3,91}{S_M}, \quad (3)$$

де  $S_M$  – метеорологічна дальність видимості в км, яку визначають експериментально, або отримують з міжнародної шкали видимості (табл. 2), наведеної в [5].

Таблиця 2

**Міжнародна шкала видимості**

Характеристика видимості	Бали	Інтервали видимості	Умови видимості
Дуже погана	0	0–50 м	Дуже сильний туман
	1	50–200 м	Сильний туман або дуже густий сніг
	2	200–500 м	Поміркований туман або сильний сніг
Погана	3	500–1000 м	Слабкий туман, поміркований сніг або сильний серпанок
	4	1–2 км	Поміркований сніг, поміркований серпанок або сильний дощ
Середня	5	2–4 км	Слабкий сніг, сильний дощ або слабкий серпанок
	6	4–10 км	Поміркований дощ, дуже слабкий сніг або слабкий серпанок
Добра	7	10–20 км	Без опадів або слабкий дощ
Дуже добра	8	20–50 км	Без опадів
Надзвичайна	9	Більше 50 км	Абсолютно чисте повітря

Розрахуємо значення показника аерозольного послаблення  $\epsilon(\lambda)$  для різних типів серпанку та типових довжин хвиль лазерних сканерів, користуючись даними табл. 1 і 2, прийнятими в міжнародній практиці. Результати подано в табл. 3.

Таблиця 3

Розраховані значення  $\varepsilon(\lambda)$  для різних типів серпанку

Періоди	Тип аерозолю	$\varepsilon(\lambda=1,064 \text{ мкм}), \text{ км}^{-1}$						$\varepsilon(\lambda=1,560 \text{ мкм}), \text{ км}^{-1}$					
		1 км	2 км	3 км	4 км	5 км	6 км	1 км	2 км	3 км	4 км	5 км	6 км
Зимовий	“Льодяний” серпанок	2,588	1,294	0,863	0,647	0,517	0,431	1,977	0,988	0,659	0,494	0,395	0,329
	Зимній серпанок	2,100	1,050	0,700	0,525	0,420	0,350	1,307	0,653	0,436	0,327	0,261	0,218
	Серпанок зі снігом	3,536	1,768	1,179	0,884	0,707	0,589	3,337	1,669	1,112	0,834	0,667	0,556
Весняно-осінній	Стойкий серпанок	2,303	1,152	0,768	0,576	0,461	0,384	1,610	0,805	0,537	0,402	0,322	0,268
	Туманний серпанок	3,059	1,530	1,020	0,765	0,612	0,510	2,557	1,278	0,852	0,639	0,511	0,426
	Серпанок з мжичкою	2,738	1,369	0,913	0,684	0,548	0,456	2,171	1,085	0,724	0,543	0,434	0,362
Літній	Після сильного дощу	1,392	0,696	0,464	0,348	0,278	0,232	0,678	0,339	0,226	0,169	0,136	0,113
	Стойкий серпанок	1,487	0,744	0,496	0,372	0,297	0,248	0,845	0,422	0,282	0,211	0,169	0,141

Результати розрахунків показують, що найсприятливішим періодом для проведення лазерного сканування є літній період. Коефіцієнти, розраховані для цього періоду, менші порівняно з коефіцієнтами зимового та весняно-осіннього періоду. Коефіцієнти послаблення зростають залежно від дальності видимості. Зі збільшенням дальності видимості на 1 км коефіцієнти зменшуються приблизно вдвічі. З покращенням видимості ця залежність спадає. Лазерні сканери, які працюють на довжині хвилі 1,560 мкм, менш чутливі до наявності в атмосфері аерозолів, ніж лазерні сканери з довжиною хвилі 1,064 мкм, що підтверджується результатами розрахунків.

Для практичного використання користуються наближеною, але зручнішою для розрахунків формулою:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{3,91}{S_M} \left( \frac{0,55}{\lambda} \right)^{0,585\sqrt{S_M}}, \quad (4)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання;  $S_M$  – метеорологічна дальність видимості в км, яку визначають експериментально або беруть з міжнародної шкали видимості (табл. 2).

У табл. 4 подано розраховані значення  $\varepsilon$  для типових довжин хвиль  $\lambda$  лазерних сканерів та метеорологічних дальностей видимості  $S_M = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  км.

Таблиця 4

Розраховані значення  $\varepsilon(\lambda)$  для типових довжин хвиль  $\lambda$  лазерних сканерів

$\lambda$ , мкм	$\varepsilon(\lambda), \text{ км}^{-1}$					
	$S_M = 1 \text{ км}$	$S_M = 2 \text{ км}$	$S_M = 3 \text{ км}$	$S_M = 4 \text{ км}$	$S_M = 5 \text{ км}$	$S_M = 6 \text{ км}$
1,064	2,658	1,202	0,747	0,530	0,404	0,323
1,560	2,125	0,907	0,541	0,371	0,276	0,215

Як видно з розрахунків, аерозольне послаблення може бути значним за несприятливих погодних умов. А за наявності туману, снігу або мжички воно збільшується у 1,5–2,5 разу. Слід зазначити, що наведені вище розрахунки відповідають певним метеорологічним умовам, а тому реальні значення коефіцієнтів послаблення можуть істотно відрізнятись. Особливо це стосується промислових зон, де в повітрі знаходиться значна кількість великих за розмірами аерозольних частинок.

У цих дослідженнях нас цікавить лише загальне послаблення випромінювання, тому не будемо окремо обчислювати частку розсіяного і поглинутого випромінювання.

В умовах великої прозорості атмосфери і слабкої турбулентності може помітно впливати і молекулярне розсіювання.

Об'ємний показник молекулярного розсіювання  $K_S(\lambda, z)$  описується таким рівнянням [9]:

$$K_S(\lambda, z) = \frac{8\pi^3 (n^2(\lambda) - 1)^2 N(z) (6 + 3\delta)}{3N_{STP}^2 \lambda^4 (6 - 7\delta)}, \quad (5)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання;  $n$  – показник заломлення повітря на довжині хвилі  $\lambda$ ;  $N(z)$  – кількість молекул в одиниці об'єму на висоті  $z$ ;  $N_{STP}$  – кількість молекул в одиниці об'єму за стандартних умов (температура 0°C, тиск 760мм.рт.ст.);  $\delta$  – фактор деполяризації розсіяного випромінювання,  $\delta=0,035$ . Значення  $N(z)$  на різних висотах беруть з таблиці значень основних параметрів стандартної атмосфери, наведеної в [10].

Розрахуємо значення  $K_S(\lambda, z)$  на різних висотах  $z$ . Результати подано в табл. 5.

Таблиця 5

**Розраховані значення об'ємного коефіцієнта розсіювання  $K_S(\lambda, z)$  для  $z=0,1,2,3,4$  км**

$\lambda$ , мкм	$K_S(\lambda, z)$ , км <sup>-1</sup>				
	$z=0$ км	$z=1$ км	$z=2$ км	$z=3$ км	$z=4$ км
1,064	$7,177 \cdot 10^{-4}$	$6,501 \cdot 10^{-4}$	$5,911 \cdot 10^{-4}$	$5,319 \cdot 10^{-4}$	$4,785 \cdot 10^{-4}$
1,560	$1,553 \cdot 10^{-4}$	$1,407 \cdot 10^{-4}$	$1,279 \cdot 10^{-4}$	$1,151 \cdot 10^{-4}$	$1,035 \cdot 10^{-4}$

Як бачимо з розрахунків, коефіцієнт молекулярного розсіювання залежить від довжини хвилі. Значення, розраховані для типових довжин хвиль лазерних сканерів та висот до 4 км, показують, що коефіцієнт розсіювання на цих довжинах хвиль є настільки малим, що ним можна нехтувати. Фактично вплив молекулярного розсіювання може бути істотним лише в ультрафіолетовій ділянці спектра [6].

**Висновки.** Домінантний вплив на послаблення лазерного променя в атмосфері належить аерозолям, селективне поглинання практично не впливає, оскільки довжину хвилі лазерних сканерів підбирають так, щоб вона потрапляла у вікно прозорості атмосфери. Молекулярне розсіювання в близькому інфрачервоному діапазоні є незначним, тому ним можна знехтувати.

Результати визначених показників аерозольного послаблення вказують на те, що найсприятливішим періодом для лазерного сканування є літній період.

Лазерні сканери, які працюють на довжині хвилі 1,560 мкм, менш чутливі до наявності в атмосфері аерозолів, ніж лазерні сканери з довжиною хвилі 1,064 мкм.

За лазерного сканування промінь проходить подвійний шлях, у процесі втрачаючи свою інтенсивність, тому за несприятливих умов можна очікувати зниження інтенсивності сигналу в 5–7 разів.

1. Бабушка А.В. Методика відтворення контурів гідрографічних об'єктів за даними авіаційного лазерного сканування / А. Бабушка // Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК "Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва" – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2011. – Вип. II (22). – С. 188–192.
2. Бабушка А.В. Особливості відбиття лазерного променя від водних об'єктів / А. Бабушка // Міжвідомчий науково-технічний збірник "Геодезія, картографія і аерофотознімання". – Львів: Національний університет "Львівська політехніка". 2012. – Вип. 76. – С. 66–70.
3. Буришинська Х.В. Використання даних лазерного сканування для побудови цифрових моделей рельєфу гідрографічних мереж гірських систем / Буришинська Х., Бабушка А., Василюк І., Пікулик С. // Міжвідомчий науково-технічний збірник "Геодезія, картографія і аерофотознімання". – Львів: Національний університет "Львівська політехніка". 2009. – Вип. 71. – С. 146–152.
4. Міжнародний проект. Данилин І.М. Лазерная локация земли и леса / И.М. Данилин, Е.М. Медведев, С.Р. Мельников. – Красноярськ, 2005. – 182 с.
5. Основы импульсной лазерной локации: Учеб. пособие для вузов / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов и др.: под ред. В.Н. Рождествина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 512 с.: ил. – (Электроника).
6. Тимофеев Ю.М. Основы теоретической атмосферной оптики: Учеб.-метод. пособие / Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. – СПб., 2007. – 152 с.
7. Chris Hopkinson, Alain Pietroniro and John W. Pomeroy, editors HYDROSCAN: Airborne laser mapping of hydrological features and resources // Saskatoon, SK., Sept. 22, 2006. – 376 p.
8. Prilutsky Oleg F., Fomenkova M.N. Laser Beam Scattering in the Atmosphere / Science and Global Security, 1990, Volume 2, No. 1, pp. 79–86.
9. Wolfe, W. and Zissis, G. J. The infrared handbook. The Infrared Information Analysis Center. Environmental Research Institut of Michigan, 1989. – 1700p.
10. <http://encyclopaedia.big.ru>