

УДК 504.064.3

М. М. Медведський¹, к.ф.-м.н.,**М. Т. Арібжанов²**, магістр,**О. С. Гавриш²**, к.ф.-м.н., доцент¹ Головна астрономічна обсерваторія НАН України
вул. академіка Заболотного, 27, м. Київ, 03680, Україна² Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна
(0472) 730261

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНОГО СТАНУ АТМОСФЕРИ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛІДАРУ

В роботі за допомогою лідарного комплексу для дистанційного зондування атмосфери, що є складовою частиною супутникової лазерної локаційної станції Київ-Голосієво, отримано експериментальні результати підрахунку фотонів, що відбилися від аерозолів, які характеризують концентрацію домішок в атмосфері. Побудовано контурні діаграми концентрації домішок від глибини зондування атмосфери і кута підвищення для чотирьох азимутальних напрямків.

Ключові слова: лідар, дистанційне зондування, концентрація домішок в атмосфері, кількість фотонів.

Вступ. Моніторинг забруднення атмосфери газовими сумішами методами лідарного зондування є актуальною задачею [1–6]. Використання лазерного дистанційного зондування дозволяє оперативно і на великих відстанях проводити вимірювання параметрів атмосфери [7–10]. В роботах [11–13] синтезовано лідарний комплекс для дистанційного зондування атмосфери, що є складовою частиною супутникової лазерної локаційної станції Київ-Голосієво [14]. Лазерний передавач випромінює на одній довжині хвилі зеленого спектру (532 нм), що дещо звужує коло його застосування. Для оцінки потенційних можливостей лідарного комплексу необхідно провести тестування його роботи як апаратної так і програмної частин. Отримані експериментальні результати, з одного боку, дозволять оцінити ефективність роботи лідарного комплексу, ступінь впливу умов експлуатації на режим його роботи, а з іншого – мають самостійну цінність, оскільки характеризують концентрацію домішок в атмосфері.

Постановка задачі. Джерелом випромінювання є лазер з довжиною хвилі 532 нм, енергією випромінювання – до 10 мДж і тривалістю випромінювання – 50 пс. Оптичний дзеркальний телескоп системи Кассегрена [14] дозволяє проводити зондування по двох координатах, змінюючи азимут та кут підвищення. Мінімальне значення кута підвищення програмно обмежене значенням 20 градусів, а

максимальне становить 80 градусів. Потенційно є можливість отримати результати для повного оберту телескопу з заданим кроком в азимутальній площині для фіксованого значення кута підвищення. В режимі тестування лідарного комплексу експериментальні дані про кількість відбитих фотонів, що характеризують концентрацію домішок в атмосфері, отримуються для чотирьох азимутальних напрямків з кроком 90 градусів. Такий експеримент після обробки дозволить побудувати картину концентрації домішок і хмар (контурні діаграми), але через фіксовану частоту випромінювача не дасть інформацію про хімічний склад. Якщо через деякий час повторно отримати результати і порівняти картинки, то можна зробити висновок про напрямок і динаміку руху повітряної маси. Розширення функціональних можливостей супутникової лазерної локаційної станції Київ-Голосієво підвищує її рейтинг серед подібних станцій, а отримана інформація насамперед може бути використана для екологічного моніторингу та для оцінки метеорологічного стану атмосфери.

Мета роботи полягає в отриманні експериментальних даних за допомогою лідарного зондування атмосфери в режимі тестування (з кроком 90 градусів в азимутальній площині), побудові контурних діаграм розподілу концентрації домішок і інтерпретація отриманих результатів.

Результати роботи. В результаті зондування атмосфери за допомогою лідaru спостерігач отримує вибірку чисел, які записані в лічильнику події для кожної комірки пам'яті, після чого їх необхідно додатково перерахувати щоб отримати з цих даних корисну інформацію про вимірювану фізичну величину, а саме, про розподіл концентрації аерозолів вздовж променя для вибраного азимуту та кута місця. Процес обробки здійснюється в кілька етапів.

Перший етап полягає в зчитуванні даних з пристрою і в процесі запису даних потрібно зробити просту арифметичну операцію – віднімання. Оскільки ми зчитуємо число з лічильника, то для нас воно не так важливе, як число імпульсів, що відповідає цій комірці. Щоб розрахувати число відбитих імпульсів, потрібно від значення поточної комірки пам'яті відняти попереднє значення, саме це число і буде нас цікавити. Слід мати на увазі, що лічильник рахує від 0 до 15, тому у випадку переповнення ми отримаємо від'ємне число. Щоб таких чисел не виникало, то в програмі обробки записаний алгоритм, який слідує за отриманими даними і в разі переповнення до отриманого результату додаватиме число 16 і в результаті отримаємо правильні дані.

Другий етап обробки теж заснований на додаванні, але в цьому випадку це буде накопичення інформації. Пояснення цього методу таке, що сам по собі один промінь є малоінформативним, тому для підвищення точності вимірювань будемо додавати значення приросту для кожної з комірок за 10 пострілів лазера. Отримані дані в результаті такого додавання не будуть значною мірою спотворені чи не правильні, а навпаки, картинка буде чіткішою внаслідок збору більшої інформації про дану ділянку напрямку. Враховуючи і динамічність ситуації на небі, картинка не буде сильно розмитою, оскільки 10 пострілів лазера з частотою 10 Гц займатимуть час 1 секунду, за цей час хмари далеко не перемістяться, тому для кожної вибірки будемо вважати, що картинка статична. В кінці додавання цих 10 вибірок під час запису в файл отриманих результатів програма буде дописувати до файлу координати телескопа, дату та час спостереження, для того, щоб в подальшому було зрозуміло де і коли було отримано дану вибірку.

Під час зондування з фіксованим азимутом потрібно обрати крок висоти. Проаналі-

зувавши технічні можливості всієї системи [11], було прийнято рішення обирати крок зміни висоти 1 градус. Для спрощення проведення дослідження максимальний кут підвищення (елевація) складає близько 70° - 80° , оскільки чим більша висота, тим тонша атмосфера і отримані дані будуть нести менше корисної інформації.

Третій етап обробки є завершальним. На цьому етапі будуються графіки отриманих даних для того, щоб візуально побачити розподіл концентрації аерозолів в атмосфері. Раніше ми говорили про приріст числа в наступній комірці пам'яті відносно попередньої, саме зараз нас буде цікавити цей приріст. Логіка аналізу відбитого променя наступна: оскільки промінь відбивається тим інтенсивніше, чим більша концентрація в повітрі домішок, тому для обробки і будемо застосовувати цей принцип, а саме – виділятимемо різними кольорами або одним кольором з різною градацією яскравості.

Опрацювання отриманих даних є не простою задачею. На початку збору та обробки даних використовується операційна система MS-DOS. Дана операційна система являється однозадачною, з прямим доступом до зовнішніх пристроїв. Крім того, через її простоту вона потребує менше ресурсів апаратної частини і це, в певній мірі, збільшує швидкодію при роботі на старих моделях ПК, які в нашому випадку і застосовувалися. В такій системі легко звернутися до паралельного чи послідовного порту, що є важливо, оскільки розроблений пристрій не має ніяких стандартних драйверів і він підключається через паралельний порт. В процесі налаштування було написано дві аналогічні програми мовою C++ та Turbo Basic. В процесі тестування ми переконалися, що доцільніше користуватися програмою на мові C++, оскільки ця програма має інші вбудовані алгоритми і має більшу швидкодію.

Програма на мові C++ буде зчитувати дані з пристрою, рахувати приріст для кожної комірки, додаватиме дані 10 вимірювань і записувати результати в файл з додаванням до файлу координати телескопа, дату та час сеансу. В результаті отримаємо для одного сеансу один файл з розширенням .dat, в якому буде дві колонки: в першій колонці порядковий номер комірки (від 0 до 8192), і в іншій колонці напроти кожного номеру комірки значення приросту. В самому заголовку файлу буде приписка координат та дати і часу.

Потім перенесемо отримані файли з комп'ютера на інший, в нашому випадку, з операційною системою Windows. Є безліч програм для побудови графіків, тому скористаємося найпоширенішою програмою – таблицним редактором Microsoft Excel. Завантажимо в програму дані кожного сеансу. В програмі будемо графіки отриманих даних і налаштуємо їх вигляд таким чином, щоб колір відповідав інтенсивності.

Розглянемо результати експерименту. Планувалося, що зондування атмосфери здійснюватиметься в півсфері, тобто азимут змінюватиметься від 0 до 360 градусів з певним кроком, а кут підвищення (елевація) складатиме від 0 до 90 градусів. Проте при проведенні реального експерименту, виявилось, що отримати такий масив експериментальних даних доволі складно, тому зміна значень азимуту проводилась з кроком 90 градусів, а кут елевації змінювався від 20 до 70 градусів з кроком 1 градус. Потенційно можна покращити верхню межу вимірювань до 80 градусів. Отримані результати по суті описуються тривимірним графіком, оскільки залежать від трьох параметрів:

- 1) відстані вимірювальної установки,
- 2) кута підвищення,
- 3) кількості фотонів, що потрапили на фотоелектронний помножувач.

На рис. 1 наведено результати зондування атмосфери за допомогою лідару. По горизонтальній вісі відкладено відліки часу проходження сигналу, один відлік відповідає 0,1 мкс, що відповідає відстані в 15 м.

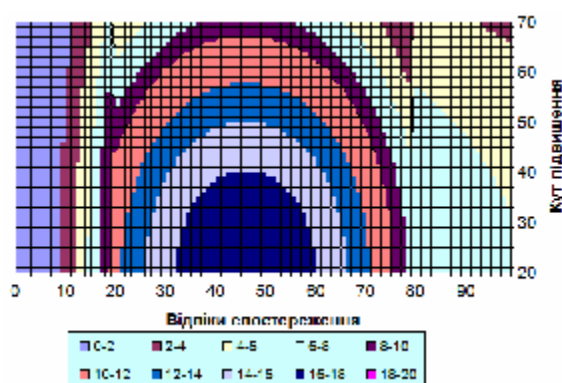


Рис. 1. Залежність концентрації фотонів від глибини зондування атмосфери і кута спостереження для значення азимуту 0° (360°)

Дані отримані для 8 192 відліків, що відповідає дальності 122,88 км, проте основний інтерес представляють висоти до 1,5 км, тобто

цілком достатньо опрацювати 100 відліків (враховуючи мінімальний кут нахилу телескопа 20 градусів). По вертикальній осі відкладається кут нахилу, тому графік сприймався б більш природно в полярній системі координат, але враховуючи великий обсяг даних і пов'язані з цим обчислювальні труднощі, обмежилися побудовою графіків в декартових координатах. Третім параметром є концентрація фотонів, що відбилися від домішок в атмосфері, яка вказує на ступінь її забрудненості. Для опису інтенсивності відбиття можна використовувати або кольорову градацію зображення (рис. 1), або класичний тривимірний графік (рис. 2). З фізичної точки зору графік, представлений на рис.1, більш зрозуміло описує якісний характер досліджуваного процесу, а графік, наведений на рис. 2, дозволяє більш точно оцінити його кількісні показники.

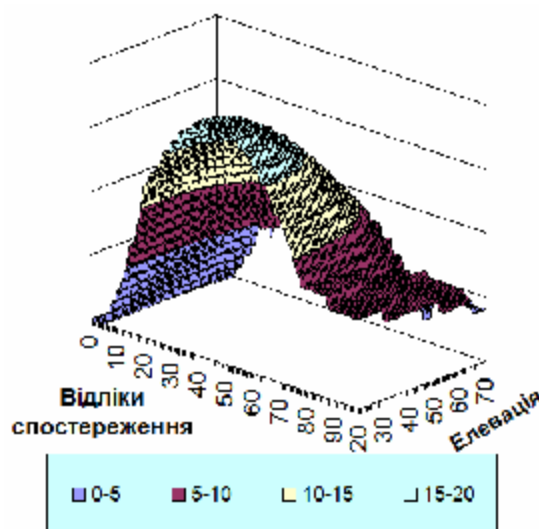


Рис. 2. Висотний профіль концентрації фотонів для значення азимуту 0° (360°)

Аналізуючи графіки, наведені на рис.1 і рис.2, можна зробити такі висновки:

- при азимуті 0 градусів максимум забруднення атмосфери відповідає сектору від 20 до 40 градусів на відстанях від джерела випромінювання орієнтовно від 495 м (33 відліка) до 915 м (61 відлік);
- низький рівень концентрації домішок в атмосфері (що відповідає потраплянню на фотоелектронний помножувач від 1 до 8 фотонів) спостерігається на відстанях від 0 до 270 метрів (18 відліків часу) для малих кутів підвищення (від 20 до 45 градусів). При подальшому варіюванні елевації спостерігається збільшення відстані, на якій концент-

рація фотонів не перевищує значення 8, і становить 555 м (або 37 відліків);

- на відстані 705 м (47 відліків) спостерігається максимальна концентрація домішок при будь-яких кутах спостереження;
- часта зміна кольорів в лівій частині графіку на рис.1 вказує на швидку динаміку підвищення концентрації домішок в атмосфері на відстанях до 705 м, в той час як однорідність фарбування графіка в правій частині вказує на сталість концентрації.

На рис.3 представлені результати зондування атмосфери для азимуту 90 градусів. В даному випадку максимум зворотного розсіювання атмосфери відповідає більш вужчому сектору від 20 до 30 градусів з меншою товщиною шару від 600 м (40 відліків) до 795 м (53 відліка).

Мала концентрація домішок в атмосфері спостерігається на тих же висотах, що і для азимутального напрямку 0 градусів, а саме на відстанях від 0 до 270 метрів (18 відліків часу) для аналогічних значень кутів підвищення (від 20 до 45 градусів). Градієнт (швидкість зміни) концентрації домішок має приблизно однакове значення для даних представлених на рис.1 і рис.3.

Екстремум графіка, представленого на рис. 3, також спостерігається на відстані 705 метрів (47 відлік).

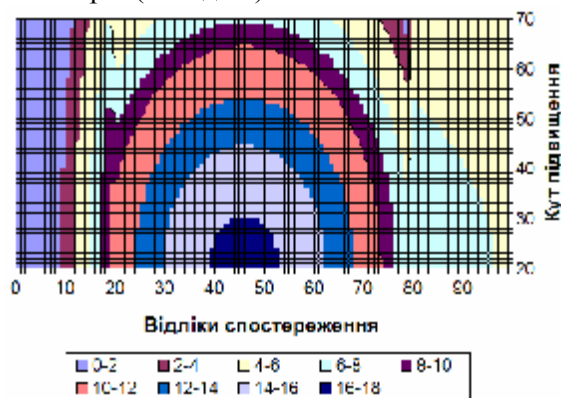


Рис. 3. Залежність концентрації фотонів від глибини зондування атмосфери і кута спостереження для значення азимуту 90°

Висока концентрація домішок в атмосфері, для азимуту 180 градусів (рис.4), спостерігається для значно меншої області простору порівняно з азимутальними напрямками 0 і 90 градусів (рис.1 і рис.3). При цьому максимальний рівень концентрації зменшується вдвічі порівняно з вже розглянутими напрямками. В даному випадку максимум забруд-

нення атмосфери спостерігається в інтервалі від 600 м (40 відліків) до 780 м (52 відліка) від джерела випромінювання для діапазону кутів підвищення від 20 до 29 градусів.

Для даного азимутального напрямку (рис. 4) спостерігається низький рівень концентрації аерозолів в атмосфері (що відповідає потраплянню на фотоелектронний помножувач від 1 до 8 фотонів) при будь-яких кутах підвищення і відстанях від джерела випромінювання. Найменша концентрація (від 1 до 4 фотонів) спостерігається на відстанях від 0 до 195 метрів (13 відліків часу) для кутів підвищення (від 20 до 49 градусів).

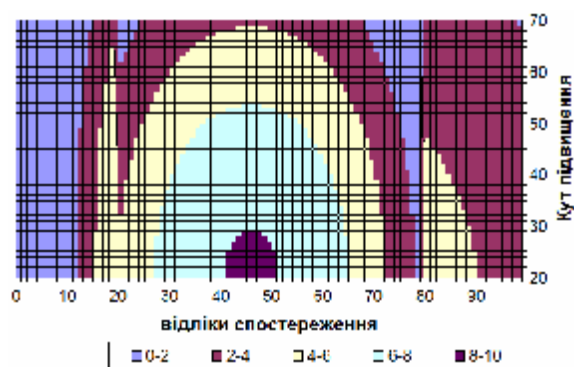


Рис. 4. Залежність концентрації фотонів від глибини зондування атмосфери і кута спостереження для значення азимуту 180°

В лівій частині графіка на рис.4 спостерігається несиметричне зростання концентрації домішок для рівнів 2-4 і 4-6 з максимумом на відстані 285 метрів (19 відліків), а в правій частині графіка після зменшення концентрації домішок до мінімального рівня на висоті 1,2 км (80 відліків) спостерігається сплеск концентрації до рівня 4-6, з поступовим зменшенням до рівня 2-4.

При азимуті 270 градусів (рис. 5) максимум забруднення атмосфери відповідає сектору від 20 до 24 градусів на відстанях від джерела випромінювання від 675 м (45 відліків) до 735 м (49 відліків). Отже товщина шару забруднення дорівнює 60 метрів.

Висновки. З отриманих графіків, можна судити про розподіл концентрації домішок в атмосфері для обраних азимутів та зміні кута підвищення від 20° до 70°. Всі графіки мають спільний максимум на відстані 705 м (47 відліків), але з різною концентрацією, з чого можна зробити висновок про наявність суцільного шару аерозолів з великою концентрацією домішок над всім місцем дослідження.

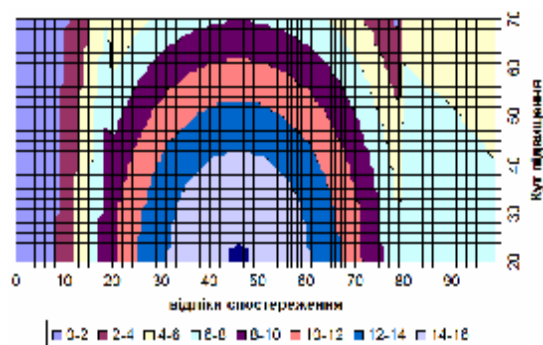


Рис. 5. Залежність концентрації фотонів від глибини зондування атмосфери і кута спостереження для значення азимуту 270°

На графіках спостерігається подібний якісний характер розподілу шарів з різною концентрацією домішок. На графіку для азимуту 180° спостерігається сплеск для рівнів 2-4 та 4-6. Поясненням таких розмитих даних є динамічність досліджуваного процесу і теоретично, якби вимірювання було проведено миттєво, то таких викидів і не спостерігалось б.

Список літератури

1. Бурков В. Д., Перминов С. В., Щукін Д. Г., Шалаев В. С. Лидарные методы контроля воздушного бассейна крупного промышленного центра в условиях чрезвычайной ситуации. *Лесной вестник*. 2013. № 7. С. 46–51.
2. Козинцев В. И., Орлов В. М., Белов М. Л. [и др.] Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды: учеб. пособие для вузов/под ред. В. Н. Рождествина. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 528 с.
3. Матвиенко Г. Г., Банах В. А., Бобровников С. М. [и др.] Развитие технологий лазерного зондирования атмосферы. *Оптика атмосферы и океана*. 2009. № 10. С. 915–929.
4. Костко О. Лазер исследует атмосферу. *Наука и жизнь*. 2002. № 12. С. 47–54.
5. Лазерный контроль атмосферы/под ред. Э. Д. Хинкли. Москва: Мир, 1979. 416 с.
6. Зуев В. Е., Зуев В. В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. 232 с.
7. Соломатин В. А. Методические указания к выполнению расчетных заданий по курсу «Лидары и сканеры»: учеб. пособ. Москва: Изд-во МИИГАиК, 2015. 23 с.
8. Веселовский И. А. Дистанционная лазерная диагностика аэрозольных и газовых составляющих атмосферы методами ра-

мановского и упругого рассеяния: дис. ... доктора физ.-мат. наук. Москва, 2005. 384 с.

9. Kirchner G., Koidl F., Kucharski D. Graz kHz SLR LIDAR: first results. *The Path toward the Next Generation Laser Ranging Network: proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging*. Potsdam, Germany, 2008. P. 373–375.
10. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере: учеб. пособ. Санкт-Петербург: Балтийский ГТУ «BOEHMEX», 2001. 56 с.
11. Medvedsky M. M., Hluschenko Yu. M., Aribjanov M. T. Lidar system on Kiev SLR 1824. *The Path toward the Next Generation Laser Ranging Network: proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging*. Potsdam, Germany, 2016.
12. Medvedsky M. M. New external calibration target on 1824. *The Path toward the Next Generation Laser Ranging Network: proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging*. Potsdam, Germany, 2016.
13. Медведський М. М., Арібжанов М. Т., Гавриш О. С. Лідарний комплекс для моніторингу метеорологічного стану атмосфери. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2017. № 1. С. 33–39.
14. Bolotina O. V., Hluschenko Yu. M., Medvedsky M. M. et al. Satellite laser ranging station 'Golosiiv-Kiev'. Technical characteristics and results of observations of 2001. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2001. 17 (6). P. 560–572.

References

1. Burkov, V. D., Perminov, S. V., Shchukin, D. G., Shalaev, V. S. (2013) Lidar methods of control of air pool in a large industrial center in an emergency situation. *Lesnoj vestnik*, No. 7, pp. 46–51 [in Russian].
2. Kozincev, V. I., Orlov, V. M., Belov, M. L. (2002) Opto-electronic systems of ecological monitoring of the natural environment. Edited by V. N. Rozhdestvin. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, p. 528 [in Russian].
3. Matvienko, G. G., Banah, V. A., Bobrovnikov, S. M. (2009) The development of technologies for atmosphere laser sensing. *Optika atmosfery i okeana*, No. 10, pp. 915–929 [in Russian].

4. Kostko, O. (2002) Laser is exploring the atmosphere. *Nauka i zhizn'*, No. 12, pp. 47–54 [in Russian].
5. Hinkli, E. D. (ed.) (1979) Laser monitoring of the atmosphere. Moscow: Mir, 416 p. [in Russian].
6. Zuev, V. E. (1992) Remote optical sensing of the atmosphere. St. Petersburg: Gidrometeoizdat [in Russian].
7. Solomatin, V. A. (2015) Methodical instructions to performance of settlement and assignments for the course "Lidar and scanners". Moscow: Izd-vo MIIGAiK, 23 p. [in Russian].
8. Veselovskii, I. A. (2005) Remote laser diagnostics of atmospheric aerosol and gas constituents by the methods of Raman and elastic scattering: thesis for Dr.Phys.-Mat.Sc., 384 p. [in Russian].
9. Kirchner, G., Koidl, F., Kucharski, D. (2008) Graz kHz SLR LIDAR: first results. *The Path toward the Next Generation Laser Ranging Network: proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging*. Potsdam, Germany, pp. 373–375.
10. Privalov, V. E., Shemanin, V. G. (2001) Lidar parameters for remote sensing of gas molecules and aerosol in the atmosphere. St. Petersburg: Baltiiskii GTU «VOENMEH», 56 p. [in Russian].
11. Medvedsky, M. M., Hluschenko, Yu. M., Aribjanov, M. T. (2016) Lidar system on Kiev SLR 1824. *The Path toward the Next Generation Laser Ranging Network: proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging*. Potsdam, Germany.
12. Medvedsky, M. M. (2016) New external calibration target on 1824. *The Path toward the Next Generation Laser Ranging Network: proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging*. Potsdam, Germany.
13. Medvedsky, M. M., Aribzhanov, M. T., Havrysh, O. S. (2017) Lidar complex for monitoring weather of atmosphere. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Seria: Tehnichni nauky*, (1), pp. 33–38 [in Ukrainian].
14. Bolotina, O. V., Hluschenko, Yu. M., Medvedsky, M. M. et al. (2001) Satellite laser ranging station "Golosiiv-Kiev". Technical characteristics and results of observations of 2001. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 17 (6).

M. M. Medvedsky¹, Ph.D.,

M. T. Aribzhanov², student,

O. S. Havrysh², Ph.D., associate professor

¹Main astronomical observatory of National academy of sciences of Ukraine
27 Akademika Zabolotnoho str., Kyiv, 03143, Ukraine

²Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

THE STUDY OF ATMOSPHERE METEOROLOGICAL STATE USING A LIDAR

In this paper, using lidar complex for remote sensing of the atmosphere, which is a part of the satellite laser locating station Kyiv-Golosievo, experimental results of counting of photons reflected by aerosols, which characterize the concentration of pollutants in the atmosphere, are obtained. Contour diagrams of impurities concentration on atmospheric probing depth and an angle of elevation for four azimuthal directions are constructed.

Keywords: lidar, remote sensing, concentration of pollutants in atmosphere, number of photons.

*Рецензенти: Лега Ю. Г., д.т.н., професор,
Палагін В. В., д.т.н., професор*