

Д.В. Стоянов, А.К. Дончев, Г.В. Коларов, Ц.А. Мицев

## ЛИДАРНАЯ СИСТЕМА С ЛАЗЕРАМИ НА ПАРАХ МЕДИ И ЗОЛОТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРОПОСФЕРЫ И СТРАТОСФЕРЫ

В работе описана усовершенствованная лидарная система, разработанная в Институте электроники Болгарской Академии наук, с лазерами на парах меди и золота и с приемом в режиме счета фотонов. Она может работать синхронно с комплексом радиометров СВЧ и ИК диапазонов спектра и радиолокационной станцией на длине волны 3,2 см. Показана возможность одновременного зондирования тропосферы (включая пограничный слой) и стратосферы до высот 25–30 км на двух длинах волн 0,51 и 0,628 мкм с хорошей пространственной разрешающей способностью и малым временем накопления.

### Введение

Одним из достоинств лидарного зондирования атмосферы является возможность одновременного измерения одним лазерным импульсом всей тропосферы и стратосферы до высот порядка 25–30 км. Важность таких исследований связана с необходимостью изучения связи между явлениями на разных высотах, оценки влияния нижних интенсивно рассеивающих слоев на интерпретацию стратосферных измерений и др. Для этого необходима высокая точность регистрации лидарных сигналов на всех высотах.

Лидарные системы для зондирования стратосферы в основном построены на твердотельных лазерах [1, 2, 3] с использованием режима счета фотонов (РСФ), а также аналогового приема (АП). Их габариты значительны и определяются главным образом размерами приемо-передающей оптики и лазерного передатчика. Они очень информативны при изучении стратосферных явлений, а при приеме сигналов от тропосферы их фотоприемники имеют очень большую засветку, что требует применения ряда методов защиты от перегрузки [4]. При этом возникают проблемы корректной регистрации сигналов от нижней тропосферы — может измениться режим приема, методика снятия данных; возможно также появление некоторой зоны нечувствительности по высоте и др.

Лидарные системы с лазерами высокой частоты повторения импульсов (например, лазерами на парах меди) реализованы для измерения профилей влажности и температуры методом СКР в нижней тропосфере [5, 6]. В [7] описан лидар с лазером на парах меди для изучения аэрозольного и молекулярного рассеяния по доплеровскому уширению линии. Лидарная система с лазером на парах меди была использована нами для исследования тропосферного аэрозоля и скорости ветра [8, 9, 10]. Ниже описана усовершенствованная лидарная система и приведены некоторые результаты его испытания.

### Лидарная система

Для устранения насыщения ФЭУ необходима низкая импульсная мощность передатчика, и поэтому достаточную среднюю мощность можно обеспечить за счет посылки импульсов высокой частоты повторения. Этим требованиям удовлетворяют лазеры на парах металлов — меди и золота, работающие с частотой повторения 5–15 кГц. Средняя мощность лазера на парах меди может превышать 50 Вт. На основе комбинации лазеров на парах металлов и РСФ можно создать систему, удовлетворяющую требованиям одновременного зондирования тропосферы и стратосферы с использованием аэрозольного и молекулярного рассеяния излучения. Ниже даны технические параметры системы:

|   |  |
|---|--|
| Лазер на парах меди .....                   | $\lambda_1 = 0,51$ мкм, $P_a = 1 - 3$ Вт           |
| Лазера на парах золота .....                | $\lambda_2 = 0,628$ мкм, $P_d = 0,5$ Вт            |
| Расходимость выходного излучения .....      | 0,2–0,5 мрад                                       |
| Телескоп Кассегрена .....                   | $\varnothing = 19$ см, $\Theta_r \sim 1 - 2$ мрад  |
| Частота повторения лазерных импульсов ..... | $F_n = 5 - 15$ кГц                                 |
| Счетчик фотонов .....                       | RF 313 M «Малверн»                                 |
| Разрешающая способность .....               | 7,5–500 м  |
| Время накопления .....                      | любое с кратностью 15 мс, (типично — 7, 10; 100 с) |
| Максимальная дальность зондирования .....   | 30 км для $\lambda_1$ и 22 км для $\lambda_2$      |
| Число каналов дальности .....               | 72   |
| Число трасс зондирования .....              | 1–3  |
| Мертвая зона .....                          | 150–200 м  |
| Динамический диапазон накопителя .....      | $-10^7$  |

Измерительный комплекс выполнен таким образом, что одновременно записываются лидарные сигналы с 72 каналов дальности, сигналы с измерителя мощности, а также сигналы с шести независимо работающих радиометров ( $R_1, R_2, \dots, R_6$ ) СВЧ и ИК диапазонов и радиолокационной станции (РЛС) на  $\lambda_3 = 3,2$  см (рис. 1). Диаграммы направленности лидара, радиометров и РЛС выставляются в одном направлении. Такое построение измерительного комплекса, при котором становится возможным одновременно зондировать одни и те же области атмосферы на многих частотах в активном и пассивном режимах, повышает информативность всей системы и точность интерпретации данных в сложных метеоусловиях.

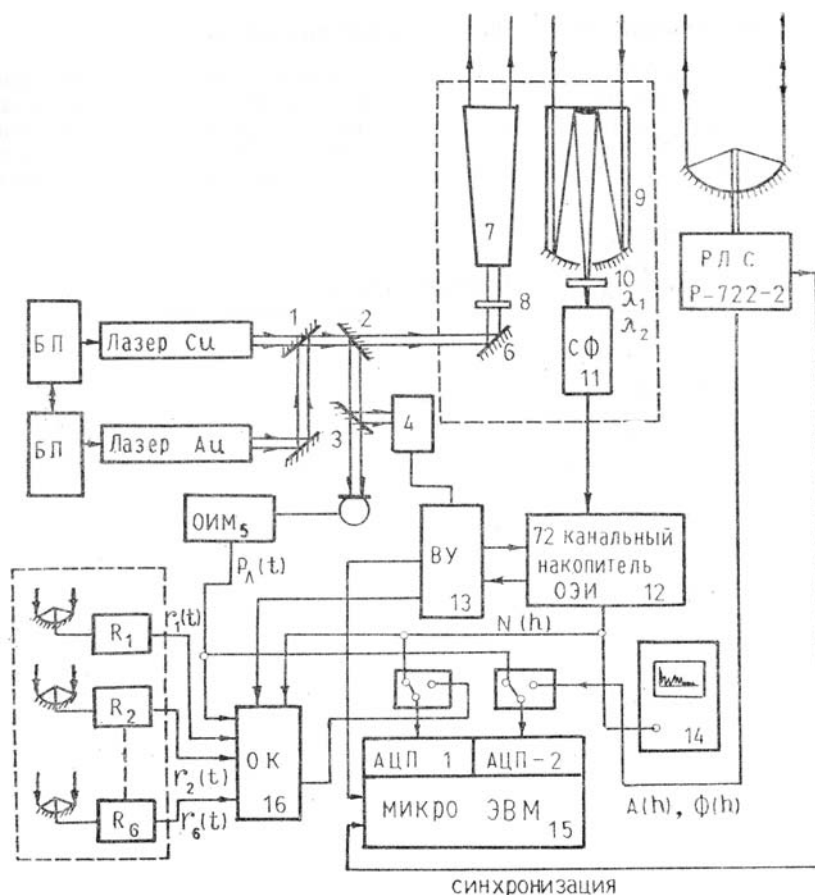


Рис. 1

Рассмотрим более подробно лидарную систему. Передатчик состоит из двух одновременно работающих лазеров на парах меди и золота, блоки питания которых синхронизованы и лазерные импульсы на обеих длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  излучаются одновременно. В настоящем же варианте измерения производятся последовательно на двух длинах волн. Для этого зеркало 1 выводится из схемы при измерении на длине волн  $\lambda_1$ . С помощью зеркал 2 и 3 часть излучаемой мощности направляется для запуска всей системы PIN-диодом 4 и для определения средней мощности (измерителем 5). Зеркалом 6 и коллиматором 7 излучение направляется в атмосферу. Перегородка 8 используется в режиме измерения фона. Отраженный сигнал собирается телескопом 9 и через набор фильтров 10 попадает на счетчик фотонов (СФ) 11, с выхода которого последовательность одноэлектронных импульсов (ОЭИ) поступает в блок накопления фотонов 12 по 72 каналам дальности [11]. Блок накопления синхронизируется блоком управления 13, вырабатывающим начальную задержку  $t_0$  запуска стробирующей последовательности. Длительность строба  $\tau_s$  равна 50 нс. Блоком управления 13 выбирается также и сигнал для времени накопления  $T_{ac}$  (длительность выборки), которое можно задавать произвольно с кратностью 15 мс. Накопленный профиль лидарного отклика  $N(h)$  в 72 точках дальности ( $h_n = h_0 + n\Delta h, n = 1 \dots 72$ ) выводится в аналоговом виде, наблюдается осциллографом 14 и подается на 12-битовый АЦП компьютера 15, синхронизируемый блоком 13. На второй АЦП подается сигнал измерителя мощности. В этом режиме лидар работает самостоятельно. При совместной работе с набором радиометров лидарный отклик подается на объединитель каналов 16, где производится его сравнение с сигналами измерителя 5  $P_n(t)$  и радиометров  $r_1(t), r_2(t), \dots, r_6(t)$ . В итоге на выходе имеем комплексный лидарно-радиометрический сигнал, содержащий 72-канальный профиль лидарного от-

клика и импульсные сигналы с амплитудами, пропорциональными  $P_n(t)$ ,  $r(t)$ ,  $r_2(t) \dots r_6(t)$ . Диапазон входных напряжений  $\pm 7$  В, который при разрядности АЦП, равной 12 бит обеспечивает точность измерения  $\pm 0,05\%$ , вполне достаточной для измерения радиояркостной температуры. Этот комплексный сигнал дальше записывается на диске. Запись РЛ-сигналов выполняется вторым АЦП синхронизацией от РЛС с выходов амплитудного или когерентного детектора. Сигнал накапливается  $m$  раз одновременно в 128 строках дальности. Увеличение чувствительности пропорционально  $\sqrt{m}$ , где  $m$  — число посылок РЛС. При  $m$ , равном  $\sim 10^3 - 10^4$ , с параболической антенной диаметром  $\sim 2$  м можно наблюдать в вертикальном направлении облака на высотах в несколько километров.

В блок управления 13 включен ряд схем для быстрой проверки работоспособности всей системы, контроля смещения нулевого уровня накопителя фотонов и др. Блоком 13 вырабатываются импульсы, имитирующие запуск от лазера, а схема смещения уровня накопителя вводит определенное количество импульсов в каждый из каналов. На выходе накопителя регистрируется равномерный по амплитуде отклик, который можно ввести в компьютер. Далее включается запуск от лазера, открывается СФ и измеряется интенсивность фона, которая должна быть в среднем одинаковой для всех каналов. Время суммарной проверки занимает около минуты.

### Экспериментальная оценка функционирования лидара

Анализ работы лидара включает в себя экспериментальную оценку функционирования системы во всей тропосфере и стратосфере до высот 30 км, оценку точности измерения лидарного отклика в зависимости от высоты, времени накопления, разрешающей способности при заданной ее конфигурации (см. технические параметры системы).

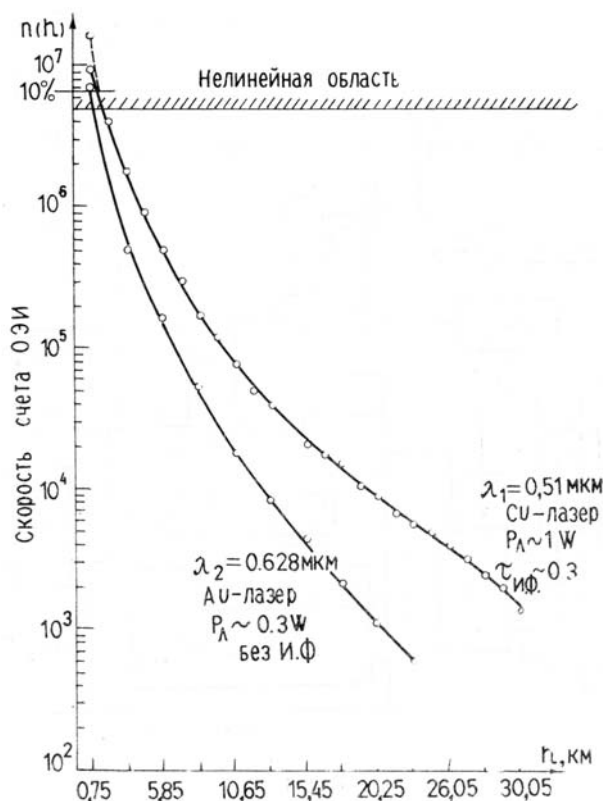


Рис. 2

На рис. 2 показаны профили лидарного отклика  $n(h)$ , выраженные в скорости счета ОЭИ от высоты  $h$  для расстояний от 0,75 до 30 км и длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Для получения среднего числа фотонов в эксперименте необходимо умножить  $n(h)$  на точное время накопления  $\tau_s \cdot F_n \cdot T_{ac}$ . На высотах  $\sim 30$  км скорость счета фотонов составляет  $\sim (1 - 1,5) \cdot 10^3$  ОЭИ/с для  $\lambda_1$ . Представляет интерес анализ скорости  $n(h)$  на нижних высотах, принадлежащих пограничному слою при заданной скорости  $n(h = 30 \text{ км})$ . На рис. 2 указана строго линейная область работы СФ  $\leq 5 \cdot 10^6$  ОЭИ/с и 10-процентное отклонение от линейности при  $n \sim 6,5 \cdot 10^6$  ОЭИ/с. Для высот более 1,5 км СФ работает в строго линейном режиме. На высотах до 0,5 км СФ также попадает в линейную область (из-за геометрической функции  $G(h)$  лидара). Имеется только интервал высот 0,5–1,5 км, где реальная скорость счета отличается от измеренной величины  $n_n(h)$  в два раза. Скорость счета ОЭИ для лазера на

парах золота ниже, чем для  $\lambda_1 = 0,51$  мкм ввиду малой мощности лазера и меньшей чувствительности фотокатода фотоприемника.

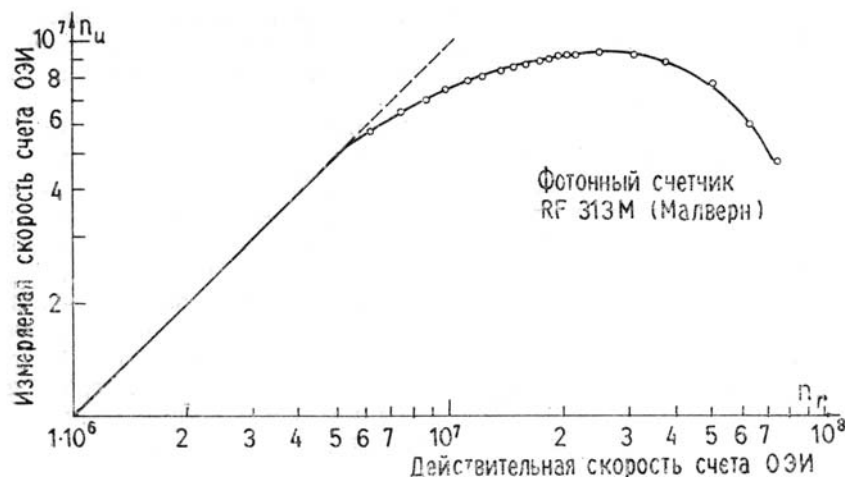


Рис. 3

На рис. 3 приведена экспериментально определенная зависимость измерений скорости счета  $n_i(h)$  для данного СФ от действительной скорости  $n_r(h)$  ОЭИ. Из совместного анализа зависимостей рис. 2 и 3 видно, что насыщение СФ неглубокое, и есть возможность восстановить истинную скорость счета ОЭИ  $n_r(h)$ . Максимальная действительная скорость равна  $17 \cdot 10^6$  ОЭИ/с. Она значительно меньше максимального быстродействия фотоумножителя типа 986308/100, длительность ОЭИ которого  $\sim 10$  нс. Поэтому «слипание» ОЭИ на всех высотах не происходит и реализуется мягкий режим облучения фотокатода ФЭУ без существенных перегрузок. Нелинейность в узком диапазоне высот обязана дискриминатору СФ и легко устраняется увеличением его быстродействия.

Следовательно, с одной стороны, можно сделать вывод, что описанная конфигурация лидарной системы с лазером на парах меди, имеющим мощность  $1-3$  Вт, и приемом в РСФ при диаметре телескопа  $\sim 20$  см позволяет зондировать одновременно тропосферу (включая пограничный слой) и стратосферу до высот  $\sim 30$  км в линейном режиме СФ без насыщения. Однако есть необходимость защиты фотоприемника от перегрузок в первых микросекундах после послышки лазерного импульса. С другой стороны, можно сказать, что параметры описанной системы близки к оптимальным, если в качестве критерия принимать возможность одновременного зондирования тропосферы и стратосферы в РСФ (без применения методов защиты и управления чувствительностью фотоприемного тракта).

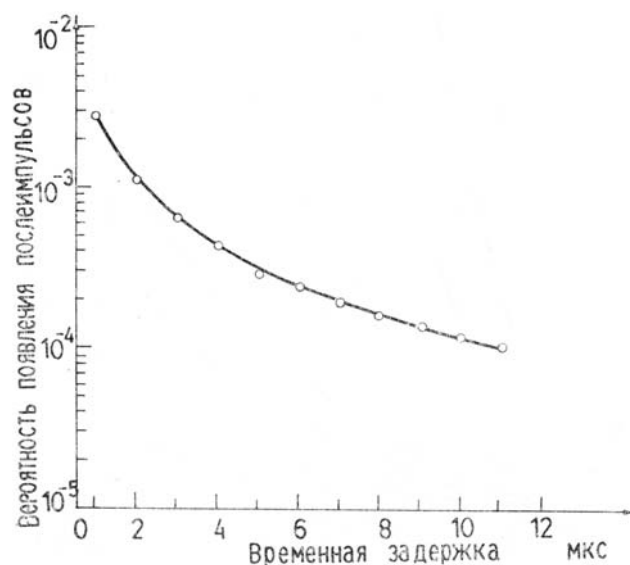


Рис. 4

Для корректной оценки истинного лидарного отклика необходимо знание вероятностной характеристики появления послепулсов ФЭУ. На рис. 4 приведена измеренная согласно методике из

[12] зависимость вероятности послеимпульсов от временной задержки по отношению к моменту попадания фотона в стробах длительностью в 1 мкс. Вероятности при задержке в 1 мкс довольно низкие ( $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ ) и становятся ниже  $10^{-4}$  при задержках больше чем 10 мкс. Суммарная вероятность послеимпульсов не превышает  $1 \cdot 10^{-2}$  для исследованного экземпляра СФ ( $4 \cdot 10^{-2}$  — для другого). По алгоритму из [12] понятно, что для использованных типов СФ систематическая ошибка от послеимпульсов небольшая и в первом приближении ею можно пренебречь.

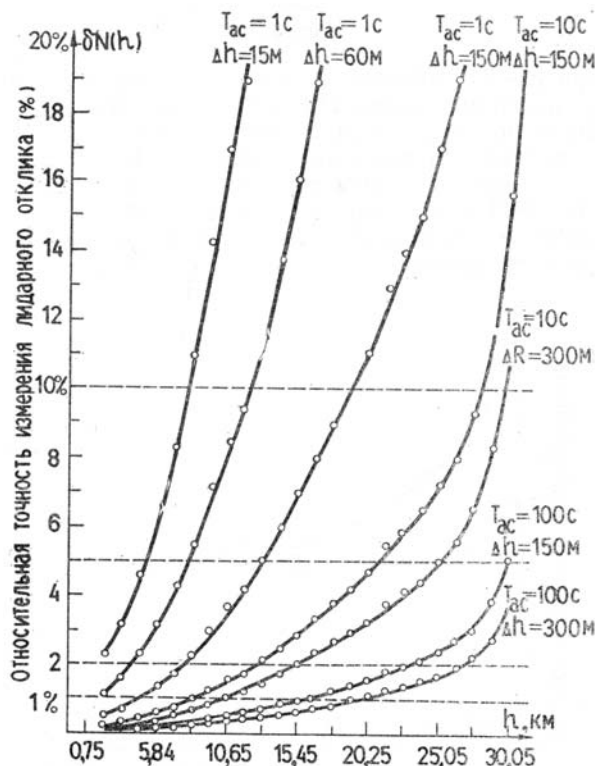


Рис. 5

Предполагая линейность работы СФ без «слипания», статистика ОЭИ будет пуассоновской (или условно-пуассоновской), что позволяет определить высотный профиль точности измерения лидарного отклика, который в этом случае определяется квантовыми флуктуациями числа фотонов сигнала  $N_s(h)$  и фона  $N_b$  (интенсивность  $n_a$  темнового тока СФ равна  $\sim 30$  ОЭИ/с, и ею можно пренебречь). Относительная погрешность  $\delta N(h)$  определяется формулой

$$\delta N(h) = \frac{\sqrt{n_s(h) + n_b}}{n_s(h)} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau_s F_n T_{ac}}},$$

где  $n_s(h)$  и  $n_b$  скорости ОЭИ сигнала и фона. На рис. 5 показаны рассчитанные профили относительной точности измерения лидарного отклика при различных, наиболее часто используемых в эксперименте временах накопления  $T_{ac}$  и пространственных разрешениях для частоты повторения 5 Кгц. Из анализа кривых на рис. 5 видно, что при типичных, для исследования стратосферы  $T_{ac} = 100$  с и  $\Delta h = 300$  м до высот 20 км точность измерения лидарного отклика не превосходит  $\pm 1\%$ , достигая при  $h = 30$  км величины  $\pm 4\%$ . Двухпроцентную точность ( $\delta N(h) \leq 2\%$ ) до высот, превышающих тропопазу, можно получить и при временах накопления  $T_{ac} = 10$  с, что особенно важно при исследовании динамики процессов в стратосфере. Времена накопления  $T_{ac} \sim 1$  с чаще всего используются при измерении скорости ветра в тропосфере корреляционным методом [9, 10]. Из рис. 5 видно, что при  $\Delta h = 150$  м  $\delta N(h) \leq 2\%$  до высот 7–8 км, что достаточно для анализа аэрозольных неоднородности с контрастностью 10–15%.

Для иллюстрации возможности лидара при исследовании стратосферы на рис. 6 показан профиль  $S(h)$  функции лидарного отклика, который хорошо привязывается к стандартному профилю релейевского рассеяния [13]. Привязка осуществлена в области тропопазы на высоте 11,5 км. Время накопления  $T_{ac} = 10$  с. Высотные вариации профиля  $S(h)$  указывает на наличие слабых аэрозольных слоев, близких к фоновой концентрации в стратосфере при отсутствии ярко выраженных следов вулканической деятельности.

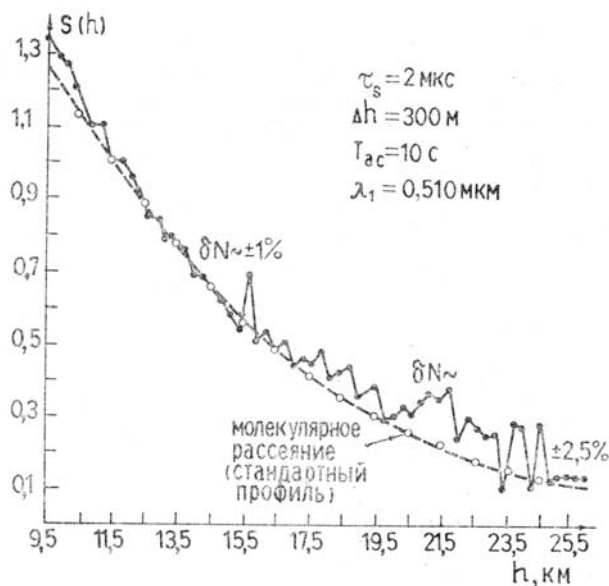


Рис. 6

### Заклучение

Разработана лидарная система с лазерами на парах меди и золота с приемом в режиме счета фотонов. Экспериментально исследованы потенциальные возможности системы при зондировании атмосферы по высоте. При заданной точности измерения лидарного отклика 1–4% на высотах 25–30 км показано, что не происходит «слипания» ОЭИ на нижних высотах, что говорит о возможности зондирования одновременно тропосферы и стратосферы в РТФ без применения методов защиты фотоприемника от перегрузки. Дана оценка влияния послеимпульсов ФЭУ на лидарный отклик. Показана возможность исследования рассеяния лазерного излучения в стратосфере.

Описанная система имеет сравнительно небольшие габариты и может найти эффективное применение в системах дистанционного контроля окружающей среды на больших дистанциях, для исследования взаимосвязи процессов в атмосфере в широком диапазоне высот, а также для измерения ряда метеорологических параметров.

1. McCormick M. P., Fuller W. H. — Appl. Opt., 1975, v. 4, pp. 4–5.
2. Measures R. M. Laser Remote Sensing — Fundamentals and Applications. — John Wiley and Sons, New York.
3. Russel P. B., Hake R. D. — J. Atmos. Sci., 1977, v. 34, No. 1, p. 163–167.
4. Иванов В. И., Малевич И. А., Чайковский А. П. Многофункциональные лидарные системы/Под ред. И. А. Малевича. — Минск: Изд-во Минского ун-та, 1986.
5. Arshinov Yu., Bobrovnikov S. M., Zuev V., Mitev V. — Appl. Opt., 1983, v. 2, p. 2984.
6. Mitev V. M., Grigorov I. V. — Bulg. J. Phys., 1985.
7. Grund S., Eloranta E. Improvements in the High Resolution lidar System. — 12 Int. Laser Radar Conf. — Aug. 1984, France.
8. Stoyanov D., Kolarov G., Ferdinandov E. et al. — Rev. Roum. Phys., 1987, v. 32, No. 1–2, p. 247.
9. Stoyanov D., Kolarov G., Ferdinandov E. et al. — Rev. Roum. Phys., 1987, v. 32, No. 1–2, p. 247.
10. Kolarov G., Stoyanov D., Ferdinandov E., Mitsev Ts. — Bulg. J. Phys., 1984, v. 11, No. 6.
11. Photon Correlation and Light Beating Spectroscopy/By Cummins H. Z., Pike E. R. Plenum Press, New York — London, 1974.
12. Shopley S. T., Trasy D. H., Eloranta E. W. et al. — Appl. Opt., 1983, v. 22, No. 23.
13. McClatchey R. A. et al. Report AFCRL-71-0279, Environm. Res. Papers, 1971, No. 354.

Институт электроники  
Болгарской Академии наук,  
София, НРБ

Поступила в редакцию  
5 ноября 1987 г.

D. V. Stoyanov, A. K. Donchev, G. V. Kolarov, Ts. A. Mitsev. Copper- and Gold-Vapor Laser Lidar System for Tropospheric and Stratospheric Studies.

A modified lidar system developed at the Institute of Electronics of Bulgarian Academy of Sciences is described. The setup employs lasers in copper and gold vapor and operates in the photon-counting receive mode. The system is integrated with a microwave and infrared radiometer complex and a radar at 3.2 cm. The feasibility of simultaneous lidar sounding of troposphere down to the boundary layer and stratosphere up to 25–30 km at 0.51 and 0.628  $\mu\text{m}$  is shown. The measurements are made with high space and time resolution.