

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 621.383.92

В.В. Зуев, А.В. Невзоров, П.А. Хряпов

**Сравнение различных типов фотоэлектронных регистраторов лидарных сигналов при зондировании атмосферного озона**

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 3.08.2000 г.

Обсуждаются результаты сравнения отечественных ФЭУ-130 и усилителей-дискриминаторов с ФЭУ R7207-01 и усилителями-дискриминаторами С3866 фирмы HAMAMATSU при зондировании озона на Сибирской лидарной станции. Показано, что возможностей расширения диапазона высот восстановления профилей озона вверх и вниз до 30% за счет большей скорости счета и лучшей квантовой эффективности у фотокаатода ФЭУ R7207-01 больше, чем у ФЭУ-130. Кроме того, применение ФЭУ R7207-01 и усилителей-дискриминаторов С3866 фирмы HAMAMATSU расширяет высотный диапазон восстановления профилей озона и повышает точность регистрируемых данных на 10–15%.

Лидарное зондирование озона на Сибирской лидарной станции (СЛС) началось с 1989 г. и продолжается в режиме регулярных наблюдений по настоящее время [1]. За этот период проводилось несколько модернизаций лидара. Обновленная принципиальная блок-схема озонового лидара приведена на рис. 1. Озоновый лидар включает в себя два передатчика на базе эксимерных ХеСl- и КгF-лазеров, снабженных ВКР ячейками на водороде для комбинационного сдвига частот излучения, и двух приемных систем с большим и малым телескопами. Параметры лидара приведены в таблице. Пара длин волн излучения 308 и 353 нм используется для зонди-

рования стратосферного озона, а 277 и 313 нм – тропосферного. Рассеянное назад излучение после прохождения приемной оптики регистрируется с помощью фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), работающих в режиме счета фотонов. В ультрафиолетовой (УФ) области спектра счетные ФЭУ имеют наивысшие чувствительность и линейность, обеспечивающие приемлемое отношение сигнал-шум в большом динамическом диапазоне до  $10^5$ . При этом параметры самих счетных ФЭУ варьируются в широких масштабах в зависимости от элементной базы, конструктивных и технологических особенностей.

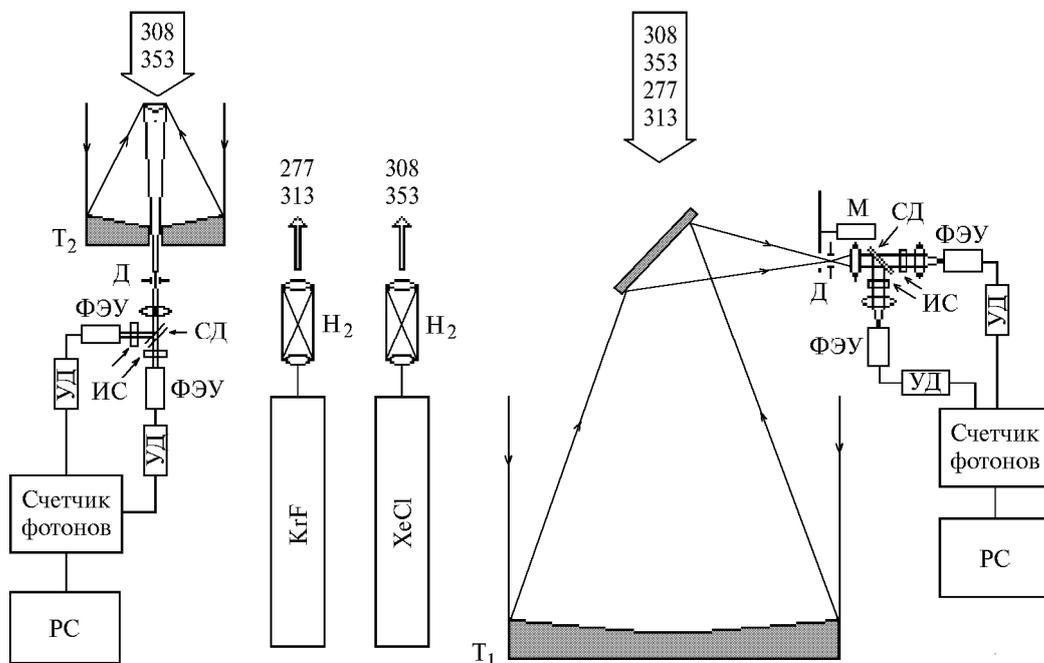


Рис. 1. Блок-схема озонового лидара: ХеСl – эксимерный лазер ( $\lambda = 308$  нм); КгF – эксимерный лазер ( $\lambda = 248$  нм); H<sub>2</sub> – кювета ВКР-преобразователя на водороде; Т<sub>1</sub>, Т<sub>2</sub> – большой и малый приемные телескопы; Д – полевая диафрагма; М – механический обтюратор; ИС – интерференционный светофильтр; СД – дихроичное зеркало; УД – усилитель-дискриминатор; РС – компьютер

Передатчик	Лазерный источник	Длины волн $\lambda$ , нм	Энергия в импульсе $E$ , мДж	Средняя мощность $P$ , Вт	Частота повторения $f$ , Гц	Расходимость $\theta$ , мрад
Стратосферный канал	ХеСl+ВКР(H <sub>2</sub> )	308, 353	80 <sub>(308 нм)</sub>	2,5	100	0,1
Тропосферный канал	KrF+ВКР(H <sub>2</sub> )	248, 277, 313	350 <sub>(248 нм)</sub>	7	20	0,1
Приемный телескоп	Диаметр зеркала $D$ , м	Фокус $F$ , м	Поле зрения $\varphi$ , мрад	Принимаемые длины волн, нм		
Система Ньютона	1	2	1	277, 313, 308, 353		
Система Кассегрена	0,25	1,1	1–2	308, 353		

Сигнал с ФЭУ поступает на усилитель-дискриминатор (УД), на выходе которого формируются стандартные импульсы транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ), преобразованные из импульсов эмиттерно-связанной логики (ЭСЛ). ТТЛ импульсы затем регистрируются счетчиком фотонов. Цепочка ФЭУ – УД играет принципиальную роль в регистрационном тракте лидара, существенно влияющем на высотный диапазон восстановления профилей озона. В связи с этим большое внимание при модернизации лидара уделяется как разработке схемных решений УД лидара, так и подбору счетных ФЭУ, работающих в соответствующем УФ-диапазоне длин волн. Отбор производился по уровню темного счета, чувствительности и динамическому диапазону линейной работы.

Первые шаги по выбору приемлемых отечественных приемников на этот диапазон длин волн, работающих в режиме счета фотонов, привели нас к ФЭУ-130 как наиболее оптимальным по квантовой эффективности фотокатода и отношению сигнал-шум. ФЭУ-130 имеет полупрозрачный сурьмяно-цезиево-калиевый фотокатод, чувствительный в области спектра от 300 до 650 нм с максимумом в области спектра 400–420 нм. Он имеет электростатическую фокусировку электронов и 12-диодную систему умножения коробчатого типа с первым диодом из арсенида-фосфида-галлия. Величины сопротивлений резисторов делителя напряжения взяты из отношений:  $R_1 = 5,2R$ ;  $R_2 = 1,18R$ ;  $R_3 = 0,82R$ ;  $R_4 = R_5 = \dots = R_{13} = R$ . Величина  $R$  выбрана 110 кОм. Номиналы емкостей, установленных на трех последних диодах, имеют следующие значения:  $C_1 = 0,15$ ,  $C_2 = C_3 = 1$  мкФ. Нумерация резисторов и шунтирующих емкостей ведется от фотокатода. В качестве нагрузки ФЭУ используется УД с входным сопротивлением 50 Ом, который имеет коэффициент усиления  $K_{yc} \sim 50$ .

После дискриминации импульсов по уровню компаратором производится преобразование ЭСЛ в ТТЛ. Выходной каскад УД выполняет формирование импульсов длительностью 15 нс с возможностью работы на нагрузку 50 Ом. ФЭУ-130 обеспечивал регистрацию лидарных сигналов с последующим уверенным восстановлением профилей озона в диапазоне высот 14–34 км [2]. Потолок зондирования озона ограничивался не только энергией лазерного передатчика, но и эффективностью фотокатода этого ФЭУ. Ограничение регистрации сигналов на меньших высотах связано с увеличением интенсивности потока фотонов и переходом работы ФЭУ-130 в смешанный режим.

Наиболее эффективным фотоприемником оказался ФЭУ R7207-01 фирмы HAMAMATSU. Он имеет бищелочной фотокатод, чувствительный в области спектра 60–650 нм с 11-диодной системой умножения коробчатого

и линейного типа и максимумом спектральной чувствительности на 420 нм. Он обладает очень малым уровнем темного счета (10 имп./с) и большой разрешающей способностью (длительность импульса анодного тока 1,7 нс), что позволяет почти на порядок увеличить скорость счета принимаемых фотонов по сравнению с ФЭУ-130. ФЭУ R7207-01 имеет максимальное напряжение питания 1500 В, тогда как ФЭУ-130 – 2200 В при почти одинаковых габаритных размерах.

В качестве усилителя регистрационного тракта лидара был выбран УД фирмы HAMAMATSU C3866 [3]. УД включает в себя усилитель выходных импульсов ФЭУ, компаратор, формирователь импульсов, расширитель импульсов, преобразователь импульсов ЭСЛ в ТТЛ и мультиплексор. УД имеет высокое отношение сигнал-шум с коэффициентом усиления выходных импульсов ФЭУ  $K_{yc} = 125$ , широкую полосу пропускания до 100 МГц при использовании делителя 1:10, который включается как с помощью переключателя, так и подачей управляющего напряжения на вход управления. Длительность выходного импульса, которую обеспечивает C3866, равна 10 нс (для режима без деления входных импульсов на 10), с делителем длительность выходных импульсов зависит от скорости счета. Разрешение пары импульсов, которое может обеспечить УД для режима без деления, – 25 нс и для режима с делением – 10 нс, что соответствует полосам частот 40 и 100 МГц.

Перед установкой новых фотоприемников на лидар нами были получены статические характеристики на стенде по исследованию отечественных и зарубежных образцов ФЭУ. Видимая часть спектра засветки отсекалась с помощью ультрафиолетового фильтра ФС1. На рис. 2 представлены счетные характеристики, снятые на стенде в одинаковых условиях при постоянном уровне засветки и использовании отечественного УД. Темновая счетная характеристика ФЭУ-130 имеет резкий подъем, начиная с напряжения питания более 2 кВ. На счетной характеристике с подсветкой нет явно выраженного плато. Напряжение питания выбирали по максимальному отношению сигнал-шум, а оно для этого экземпляра ФЭУ оказалось 2000 В. ФЭУ R7207-01 имеет довольно выраженное плато счетной характеристики, которое начинается с напряжения 920 В. Максимальное отношение сигнал-шум для этого ФЭУ наблюдается при напряжении питания 950 В, которое и было выбрано в качестве рабочего. Для этих типов ФЭУ счетные характеристики получены при уровне порога дискриминации 60 мВ.

После испытания на стенде фотоприемники были установлены на лидаре. Зарегистрированные сигналы корректировались для учета возможного «слипания» импульсов фототока по формуле [4]:

$$M = N \exp(-N\tau/n\Delta T),$$

где  $N$  – число поступающих на вход ФЭУ фотонов;  $M$  – зарегистрированное число одноэлектронных импульсов (ОИ);  $n$  –

число измерений;  $\tau$  – ширина ОИ на уровне порога дискриминации;  $\Delta T$  – длительность строба. Для ФЭУ-130 длительность ОИ на уровне порога дискриминации составляет 13 нс, а для ФЭУ R7207-01 всего 1,7 нс.

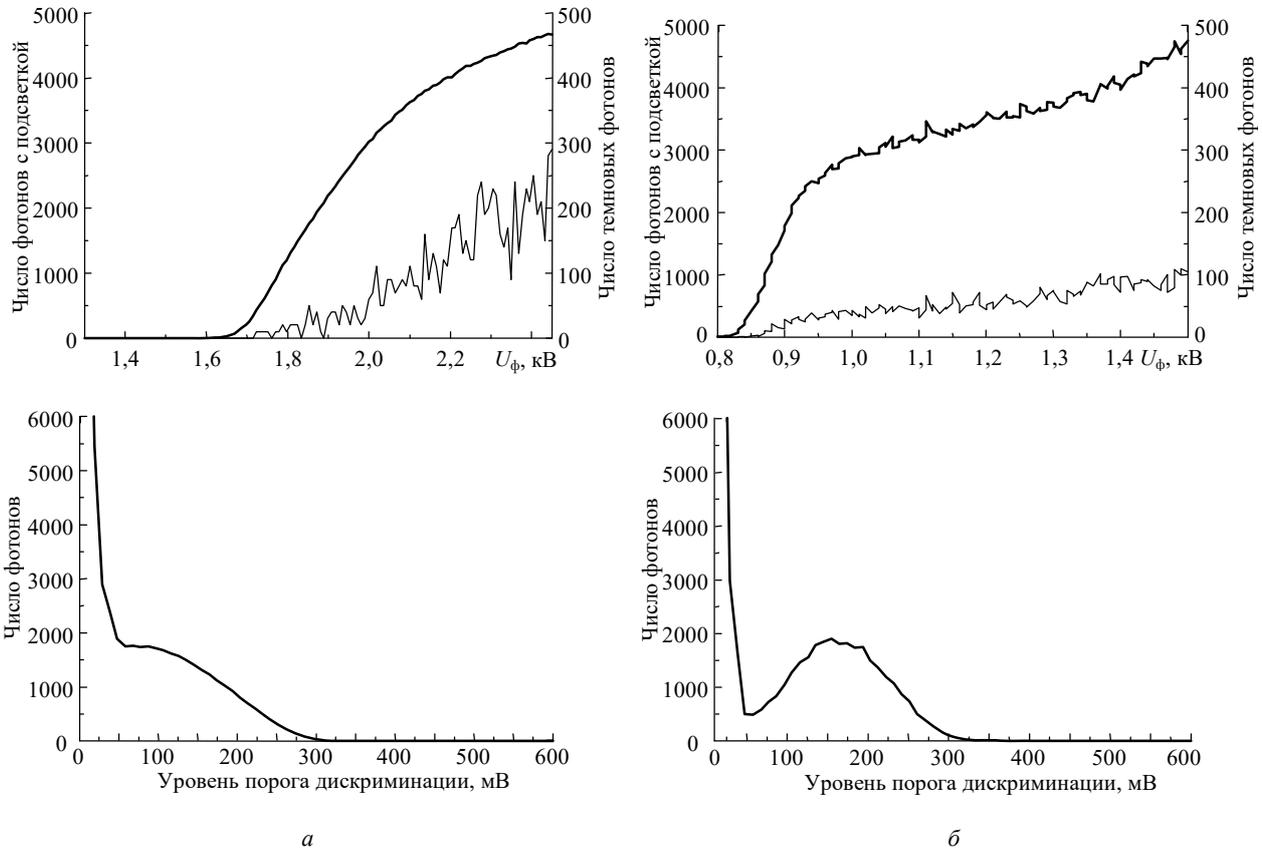


Рис. 2. Счетная характеристика и амплитудное распределение; ФЭУ-130 – а; ФЭУ НАМАМАТСУ R7207-01 – б

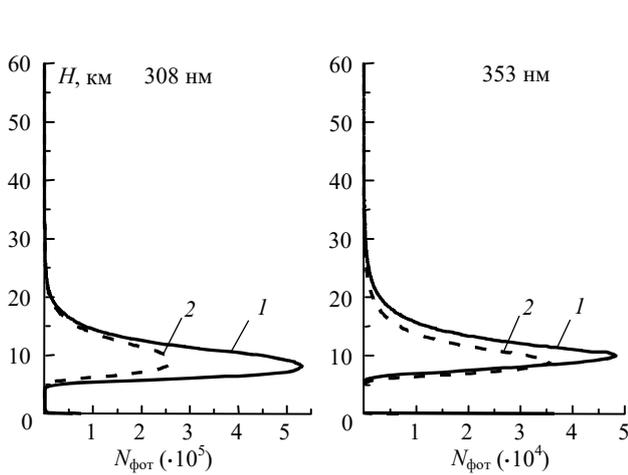


Рис. 3. Зарегистрированные лидарные сигналы по каналам 308 и 353 нм: кривая 1 – приемно-усилительный тракт с ФЭУ и усилителями-дискриминаторами фирмы НАМАМАТСУ; 2 – приемно-усилительный тракт с ФЭУ-130 и отечественными усилителями-дискриминаторами

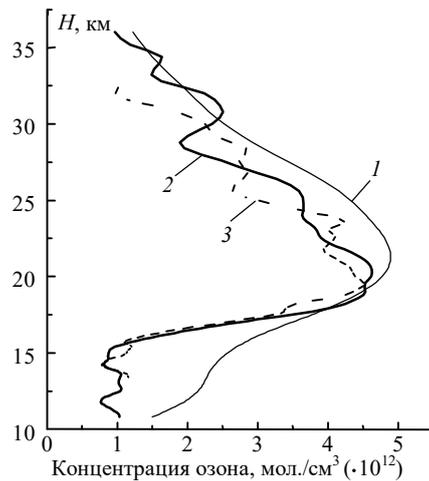


Рис. 4. Восстановленные профили озона: кривая 1 – модель Крюгера; 2 – восстановленный профиль озона, зарегистрированный с помощью ФЭУ и усилителей-дискриминаторов фирмы НАМАМАТСУ; 3 – восстановленный профиль озона, зарегистрированный с помощью ФЭУ-130 и отечественных усилителей-дискриминаторов

Накопленные сигналы представлены на рис. 3. Сигналы в максимуме для канала 353 нм отличаются на 40%, а для канала 308 нм – в два раза.

Восстановление профилей озона из лидарных данных осуществлялось на основе применения дифференциального поглощения и рассеяния с использованием эффективных алгоритмов сплайн-аппроксимации [5]. Полученные профили показаны на рис. 4, из которого видно, что если с использованием отечественных фоторегистраторов удается восстановить профили озона в диапазоне высот 14–34 км, то применение изделий фирмы НАМАМАТСУ позволяет расширить этот диапазон до 11–36 км. Расширение высотного диапазона объясняется лучшими квантовой эффективностью и быстродействием ФЭУ фирмы НАМАМАТСУ. Различие в быстродействии почти на порядок является причиной наблюдаемого несовпадения профилей озона, в том числе в максимуме.

Таким образом, модернизация озонового лидара новыми ФЭУ R7207-01 и усилителями-дискриминаторами

C3866 фирмы НАМАМАТСУ позволила не только расширить высотный диапазон восстанавливаемых профилей озона в стратосфере почти на 30%, но и повысить точность регистрируемых данных на 10–15%.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке Миннауки РФ по гранту № 01-64 «Сибирская лидарная станция» и гранту РФФИ № 99-05-64943.

1. Зуев В.В. // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 94–99.
2. Маричев В.Н., Зуев В.В., Хряпов П.А., Долгий С.И., Невзоров А.В. // Оптика атмосферы и океана, 1999. Т. 12. № 5. С. 428–433.
3. *Operational manual* «How To Use Photon Counting Unit C3866», НАМАМАТСУ.
4. Гольданский В.И., Куценко А.В., Подгорецкий М.И. Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц. М.: Физматгиз, 1959. 24 с.
5. Зуев В.В., Катаев М.Ю., Маричев В.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 9. С. 1103–1111.

*V.V. Zuev, A.V. Nevzorov, P.A. Khryapov. Comparison of different types of photoelectric systems of lidar signal recording in sensing of atmospheric ozone.*

In the paper, we discuss the results of comparison between domestic photomultiplier tubes PM-130 coupled with amplifiers-discriminators and PMT R7207-01 coupled with НАМАМАТСУ C3866 amplifiers-discriminators, used for ozone sensing at Siberian Lidar Station. It is shown that photomultiplier R7207-01 has higher counting rate and greater quantum efficiency than PM-130, therefore it can provide ozone profile retrievals in up to 30% wider (upward plus downward) altitude range. It is shown that, using R7207-01 photomultiplier and НАМАМАТСУ C3866 amplifiers-discriminators, it is possible to increase the altitude range of ozone profile retrievals and improve the accuracy of data recording by 10–15%.