

ли устойчивыми и регистрировались масс-спектрометрически с использованием традиционного источника с электронным ударом. Таким образом, используя способность солей органических кислот к кластерообразованию при испарении, можно путем добавки щелочно-галоидной соли (лучше всего содержащей Li) к анализируемым пробам кислот значительно, на 1-2 порядка, увеличить чувствительность масс-спектрометрического анализа при использовании ионизации электронами.

### Список литературы

- [1] *Vastola F.J., Mumma R.O., Pirone A.J.* // *Org. Mass Spectrom.* 1970. Vol. 3. N 1. P. 101-104.
- [2] *Mumma R.O., Vastola F.J.* // *Org. Mass Spectrom.* 1972. Vol. 6. N 12. P. 1371-1376.
- [3] *Grade H., Cooks R.G.* // *J. Am. Chem. Soc.* 1978. Vol. 100. N 18. P. 5615-5621.
- [4] *Beckey H.D., Levsen K., Röllgen F.W., Schulten H.-R.* // *Surf. Sci.* 1978. Vol. 70. N 1. P. 325-362.
- [5] *Day R.J., Unger S.E., Cooks R.G.* // *Anal. Chem.* 1980. Vol. 52. N 4. P. 557A-572A.
- [6] *Галль Л.Н., Туркина М.Я.* // *Успехи химии.* 1985. Т. 54. № 5. С. 741-764.

Физико-технический институт им.А.Ф. Иоффе  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
21 июля 1993 г.

07:12  
© 1994 г.

*Журнал технической физики, т. 64, в. 3, 1994*

## ДИСТАНЦИОННЫЙ ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ВЕЩЕСТВА В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО КОМПЛЕКСА ВЕРТОЛЕТНОГО БАЗИРОВАНИЯ

*А.Ф.Бункин, А.В.Резов, Д.Ю.Ципенюк*

В последнее время происходит активное развитие лабораторных методов атомного эмиссионного анализа вещества и соответствующей аппаратуры для различных целей металлургической промышленности, геологии, экологии и т.п. [1-4]. В этом ряду важное место занимают методы дистанционного анализа, позволяющие устанавливать аппаратуру на самолетах, судах, автомобилях, что дает возможность быстро обследовать большие территории за короткое время и получать распределение концентраций интересующих нас элементов в почве, воде или воздухе [5-11].

В мае-июне 1993 г. нами были проведены наземные испытания комплекса лазерного дистанционного зондирования, установленного на вертолете КА-32, с целью определения возможности использования данной аппаратуры для дистанционного элементного анализа вещества.

Схема лазерного комплекса приведена на рис. 1. Комплекс состоит из следующих элементов: лазер на кристалле  $YAC:Nd^{3+}$  с удвоением частоты ( $\lambda = 532$  нм), энергия в импульсе второй гармоники 200 мДж, длительность импульса около 15 нс, частота повторения 1-10 Гц. Приемно-передающая моноэлектронная схема установки

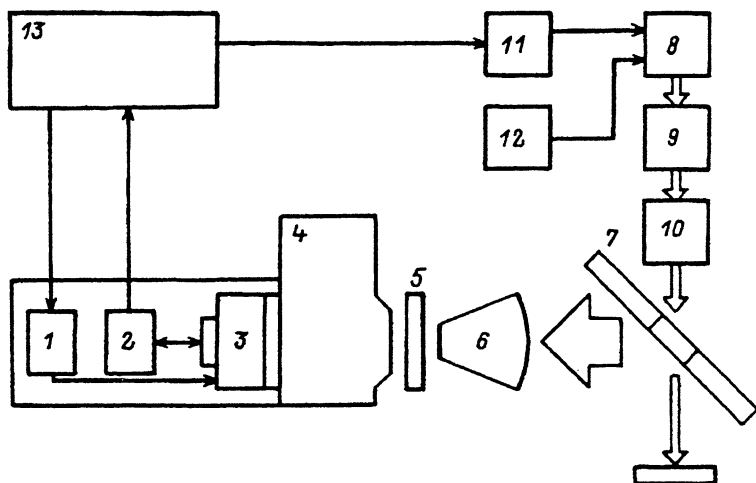


Рис. 1. Схема лидарной установки.

1 — генератор стробирующих импульсов, 2 — система управления ПЗС линейки, 3 — стробируемый усилитель яркости, 4 — полихроматор, 5 — фильтр, 6 — телескоп, 7 — поворотное зеркало, 8 — лазер, 9 — удвоитель частоты, 10 — генератор третьей гармоники (в данных экспериментах не использовался), 11 — блок питания лазера, 12 — система охлаждения, 13 — блок управления лидарной системы.

включает в себя зеркальный телескоп диаметром 15 см, полихроматор, систему поворотных зеркал и фотоприемник на основе ЭОП с усилением яркости и регистрацией на ПЗС линейку 1200ЦЛ7 (1024 элемента). Все управление комплексом осуществляется от бортовой ЭВМ. Спектральная разрешающая способность системы 1.1 нм/канал, чувствительность в области 200–800 нм около 1000 фотонов/отсчет. Кроме того, приемник выполнен стробируемым по времени и может работать как в непрерывном режиме, так и в режиме синхронизации с лазером. Длительность стробирующего импульса 10  $\mu\text{s}$ , передний фронт около 100 нс. Строб может под управлением от ЭВМ сдвигаться по времени относительно лазерного импульса.

Данная лазерная система, ориентированная на классические задачи лазерного дистанционного зондирования водоемов и наземной растительности [11], была нами модифицирована так, что стало возможно фокусировать лазерное излучение на поверхность исследуемого образца. Для этого в приемно-передающий тракт лидара был введен фокусирующий элемент, который позволил стабильно инициировать плазму на поверхности объектов, расположенных на летном поле.

В [8] исследована динамика непрерывного и линейчатого эмиссионных спектров плазмы, возникающей на поверхности водных растворов под действием сфокусированного лазерного излучения при атмосферном давлении. Показано, что интенсивность непрерывного спектра излучения описывается экспоненциальным законом и существенно спадает уже через 2–3 мкс после лазерного импульса. Кроме того, к этому времени практически перестает излучать возбужденный расширяющейся плазмой воздух.

Поэтому применение стробирующего приемника импульса, открывающего приемник на несколько мкс позже окончания лазерного импульса и имеющего длительность 10  $\mu\text{s}$ , дает, с одной стороны, возможность

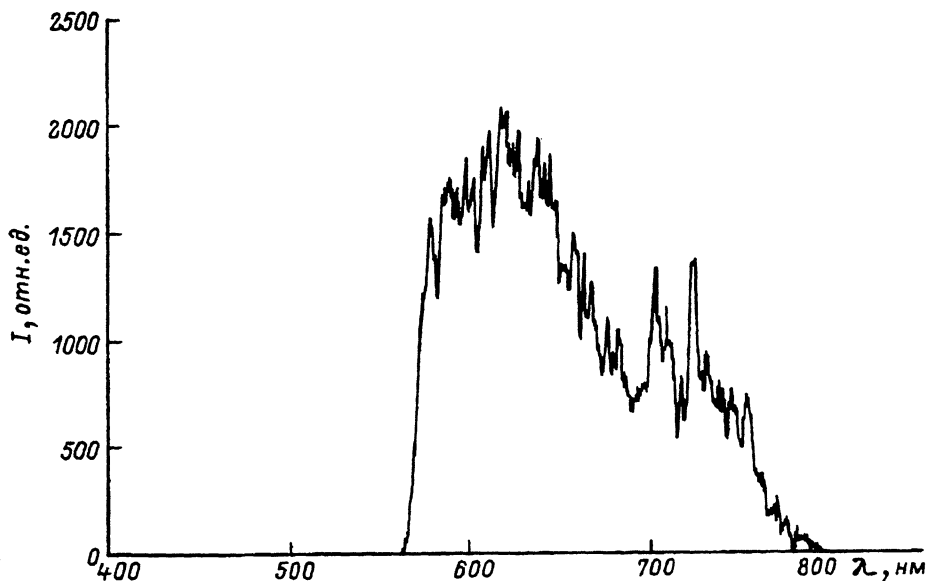


Рис. 2. Интегральный спектр плазмы, инициированный на поверхности медной пластинки.

существенно уменьшить паразитную засветку от рассеянного лазерного и солнечного излучения, непрерывного эмиссионного спектра и от ионизированного воздуха, а с другой, достаточно длительный строб позволяет эффективно регистрировать линейчатый спектр от интересующего нас вещества мишени, что важно при дистанционном варианте зондирования.

На рис. 2 приведен полученный в ходе эксперимента интегральный эмиссионный спектр плазмы, инициированной на поверхности медной пластины. Эксперименты проводились в дневное время при слабой облачности. Образцы помещались под вертолет, после чего на исследуемую поверхность через люк фокусировалось лазерное излучение.

В коротковолновой части спектр ограничен пропусканием установленного перед приемником фильтра ОС-13, который отсекает рассеянное назад лазерное излучение. На рис. 3,а приведен мгновенный спектр этого же образца, при этом фильтр ОС-13 убран, так как лазерное излучение отрезано по времени стробирующим импульсом (начало строба примерно через 5 мкс после окончания лазерного импульса).

Из сравнения спектров рис. 2 и 3, а видно, что если в случае регистрации интегрального эмиссионного спектра трудно выделить полезный сигнал от атомов меди, то во втором случае непрерывный фон и линии от воздуха практически отсутствуют. Для сравнения на рис. 3, б приведены положение и относительная интенсивность эмиссионных линий меди по справочнику [12].

На рис. 4,5 приведены эмиссионные спектры бетона и сухого дерева, полученные в той же схеме эксперимента с задержкой стробирующего импульса на 5 мкс относительно импульса лазера. В спектре бетона (рис. 4) четко просматриваются линии  $\text{Si}^{2+}$  (дважды ионизованных атомов кремния). Эмиссионный спектр сухого дерева (рис. 5) в силу сложного химического состава образца состоит из большого числа

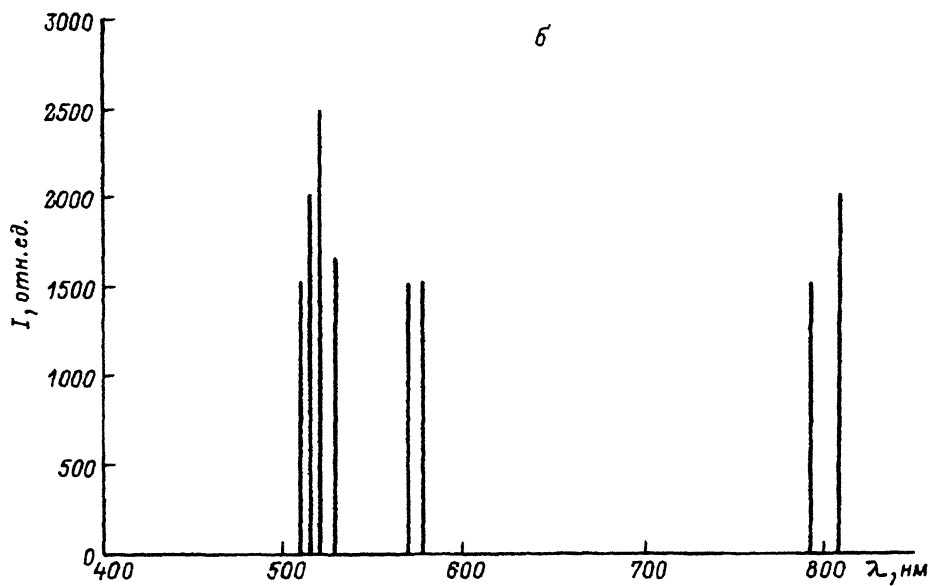
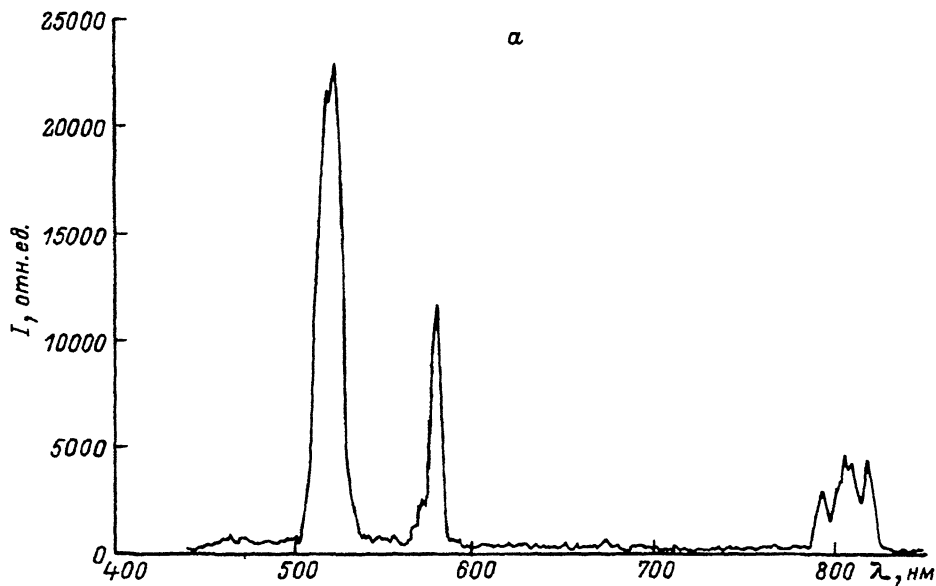


Рис. 3. Мгновенный эмиссионный спектр меди, снятый с задержкой 5 мкс после лазерного импульса (а), и положение и относительная интенсивность эмиссионных линий меди (б).

линий. Однако в этом спектре ясно обнаруживаются линии водорода  $H_\alpha$  и  $H_\sigma$  (второй порядок —  $410 \times 2$  нм). Отметим, что эти линии не наблюдались при возбуждении спектров на поверхности металлов и образцов минералов, т.е. они не связаны с разложением в плазменном факеле молекул воды, содержащейся в атмосфере, а возникают в спектре в результате атомизации и возбуждения молекул углеводородов, содержащихся в древесине.

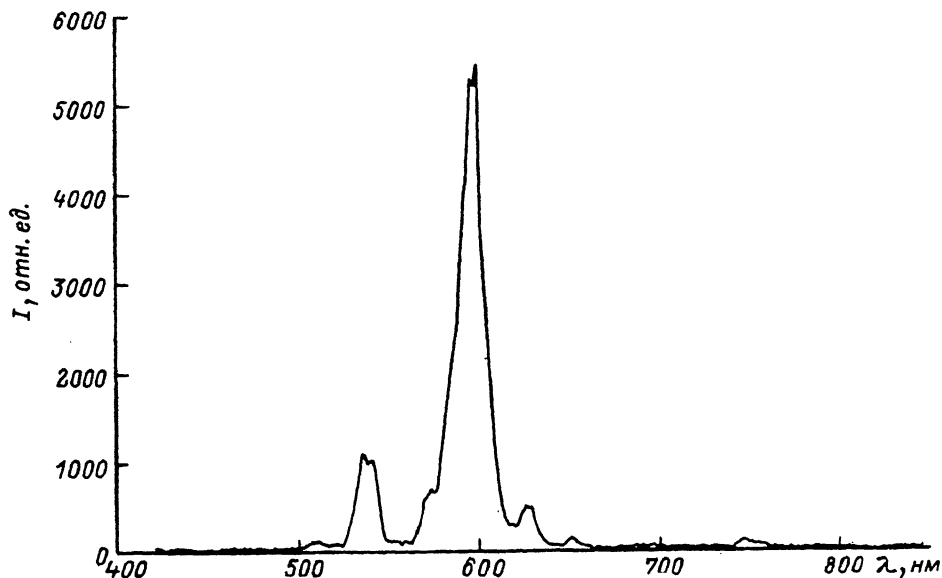


Рис. 4. Эмиссионный спектр бетона, полученный при задержке стробирующего импульса на 5 мкс относительно импульса лазера.

В лаборатории нам легко удалось с помощью сфокусированного излучения от аналогичного лазера инициировать плазму на поверхности мишеней с расстояний более 15 м. Учитывая тот факт, что специализированный спасательный вертолет КА-32 может легко работать на малых высотах и выдерживать высоту с точностью 20–30 см, данный лазерный комплекс может быть эффективно использован в эксперимен-

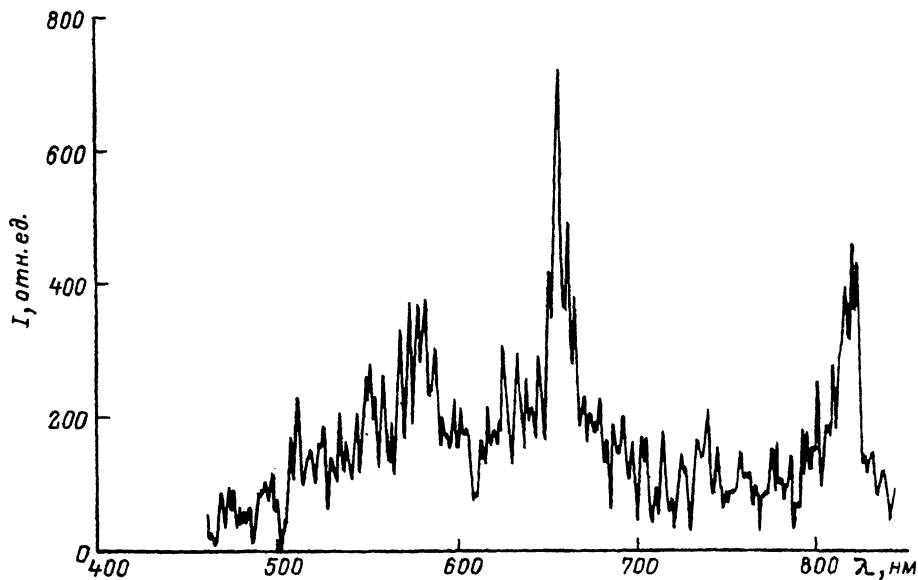


Рис. 5. Эмиссионный спектр сухого дерева, полученный в той же схеме эксперимента с задержкой стробирующего импульса.

тах по дистанционному элементному анализу вещества как для суши, так и для морских исследований.

Таким образом, открывается возможность получения на борту вертолета в ходе летного эксперимента детальной информации о химическом составе горных пород, поверхностных загрязнений водоемов и суши, металлических конструкций.

Авторы выражают благодарность А.Л.Суровегину и М.В.Солнцеву за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

#### Список литературы

- [1] *Першин С.М., Бухаров А.Ю., Кривеукая Н.Н. и др.* // ЖПС. 1991. Т. 54. № 7. С. 1011-1015.
- [2] *Hardjoutomo W., Muneshika H., Kurniawan H. et al.* // Opt. & Laser Technol. 1992. Vol. 24. N 5. P. 273-277.
- [3] *Токтоногов С.М., Чокоев Э.С., Чалымов А.* // ЖПС. 1992. Т. 56. № 1. С. 112-115.
- [4] *Карякин А.В., Симонова Л.В., Старшинова Н.П.* // ЖПС. 1992. Т. 57. № 3-4. С. 204-213.
- [5] *Прохоров А.М., Власов Д.В., Ципенюк Д.Ю.* // ЖПС. 1981. Т. 55. № 2. С. 313-315.
- [6] *Власов Д.В., Прохоров А.М., Ципенюк Д.Ю. и др.* // ЖПС. 1991. Т. 55. № 6. С. 919-927.
- [7] *Букин О.А., Зинин Ю.А., Свириденков Э.А. и др.* // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 11. С. 1213-1216.
- [8] *Vlasov D.V., Prokhorov A.M., Tsipenyuk D.Yu.* // Sov. J. Quant. Electron. 1991. Vol. 21 (10). P. 1120-1121.
- [9] *Prokhorov A.M., Tsipenyuk D.Yu., Vlasov D.V.* // Conference on Lasers and Electro-Optics. 1992. Vol. 12. OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, DC 1992). Paper CTh140.
- [10] *Самохвалов И.В., Копытин Ю.Д., Инполитов И.И. и др.* Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности. Новосибирск, 1987.
- [11] *Bunkin A.F., Suravegin A.L.* // Advances in Remote Sensing. 1992. Vol. 1. N 2. P. 101-105.
- [12] *Стригалов А.П., Свентицкий Н.С.* // Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М.: Атомиздат, 1966.

Институт общей физики  
Москва

Поступило в Редакцию  
19 июля 1993 г.